

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Departamento de Engenharia Civil

**Estudo laboratorial de escoamentos em leitos com vegetação
emersa e rígida**

João Pedro Sobrinho Lory

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade
Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil —
— Perfil de Construção

Orientador: Prof. João Leal (FCT-UNL)
Co-orientador: Prof. Rui Ferreira (IST)

Lisboa, Junho 2011

"Copyright" Todos os direitos reservados. João Pedro Sobrinho Lory.
Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Este estudo foi realizado no Instituto Superior Técnico sob a orientação do Professor João Leal da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, e co-orientação do Professor Rui Ferreira do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa.

Em primeiro lugar agradeço ao Professor João Leal pela orientação, apoio e disponibilidade imediata que demonstrou ao longo da realização desta dissertação. Agradeço também a oportunidade de me integrar neste projecto.

Ao Professor Rui Ferreira agradeço o esforço para acompanhar de perto o desenvolvimento deste trabalho e a prontidão demonstrada em todas as etapas. A sua orientação e a forma clara como partilha conhecimentos foram elementos fundamentais durante a elaboração deste trabalho.

À Ana Margarida Ricardo, um agradecimento especial, pela motivação e companhia durante os meses de trabalho no laboratório e empenho total em acompanhar de perto o meu trabalho. Agradeço também por todos os conhecimentos transmitidos sobre a utilização do Latex e Matlab. A sua perseverança, entusiasmo e alegria contagiante de trabalhar acabou por me inspirar positivamente durante a realização deste estudo.

À Dulce agradeço o esforço e eficiência em tratar de todas as questões formais e burocráticas.

Ao João Pedro agradeço todo o apoio técnico no laboratório e por fazer sempre todos os possíveis para ajudar e dar continuidade aos trabalhos experimentais.

A todos os meus amigos, um enorme agradecimento por serem fantásticos, pela amizade sem precedentes e incentivo ao longo de todo o meu percurso académico. À Alba Rodrigues por todo o amor e dedicação constantes.

Agradeço à minha família, em particular aos meus pais e irmão, por todo o apoio e confiança que sempre depositaram em mim. Sem vocês certamente não seria possível chegar até aqui.

Também agradeço à Fundação para a Ciência e Tecnologia pelo financiamento prestado no âmbito do projecto PTDC/ECM/099752/2008 no qual se enquadra esta dissertação.

Resumo

O coberto vegetal presente na superfície dos leitos e margens dos cursos de água desempenha um papel fundamental para evitar o risco de erosão hídrica, proporcionar habitats e depurar o escoamento. Nos últimos anos, crescentes preocupações ambientais motivaram a necessidade de compreensão do comportamento hidrodinâmico de rios sujeitos a reabilitação morfológica e ecológica, nomeadamente quanto à interacção do escoamento com vegetação.

No âmbito da presente dissertação, pretende-se caracterizar experimentalmente escoamentos em leitos povoados por vegetação emersa e rígida. Simularam-se as condições do escoamento para dois leitos e duas densidades de hastes, num total de três ensaios. Recorrendo a um sistema de medição de reduzida intrusão, o *Particle Image Velocimetry* (PIV), mediram-se os campos de velocidade instantânea do escoamento. O tratamento de dados consistiu na aplicação da metodologia de dupla média espaço-temporal, necessária para caracterizar escoamentos com grande heterogeneidade espacial.

Os resultados obtidos permitiram concluir que a influência relativa do leito diminui com o aumento da densidade de hastes. A ordem de grandeza dos termos dispersivos na equação de conservação da quantidade de movimento é idêntica à dos termos turbulentos. Em geral, observou-se um aumento de tensões dispersivas e de Reynolds para um aumento de densidade de hastes, como também, para um aumento do comprimento de onda formas do fundo.

Ao contrário do caso de escoamentos em camada limite de fundo, em que existem perfis universais de primeiros e segundos momentos de quantidades turbulentas, não parece haver, em escoamentos com vegetação emersa e rígida, escalas características que normalizem as quantidades turbulentas por forma a obter perfis universais. Como consequência da natureza complexa do escoamento, as escalas parecem depender da variável em análise.

Palavras chave: Vegetação emersa rígida, PIV, metodologia de média dupla espaço-temporal

Abstract

The presence of vegetation on the surface of the beds and banks of watercourses plays a key role to avoid the risk of erosion, provide habitat and depurate the flow. In recent years, increasing environmental concerns have motivated the need to understand the hydrodynamic behavior of rivers subjected to morphological and ecological rehabilitation, especially the interaction between flow and vegetation.

In this thesis, it is intended to experimentally characterize flows in beds populated by emergent and rigid vegetation. Flow conditions were simulated for two beds and two densities of stems, in a total of three tests. Using a reduced intrusive measuring system, the Particle Image Velocimetry (PIV), the instantaneous velocity flow fields were measured. The data treatment consists in applying the double-average methodology required to characterize flows with large spatial heterogeneity.

The results showed that the relative influence of the bed decreases with increasing density of rods. The magnitude of the form-induced terms in the momentum equation is identical to the turbulent terms. In general, it is observed an increase of form-induced and Reynolds stresses for an increase of stems density, but also, for an increase of the bed forms wavelength.

Unlike the case of turbulent bed boundary layer, where there are universal profiles of first and second moments of turbulent quantities, it seems that in emergent and rigid vegetation flows, there are no characteristic scales for standardizing the turbulent quantities in order to obtain universal profiles. As a consequence of the complex nature of the flow, the scales seem to depend on the variable under consideration.

Keywords: Emergent rigid vegetation, PIV, double-average methodology

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objectivo	2
1.3	Metodologia	2
1.4	Organização da dissertação	3
2	Revisão bibliográfica	5
2.1	Escoamentos em leitos com vegetação	5
2.2	Escoamentos turbulentos e camada limite	7
2.3	Metodologia de média dupla espaço-temporal (DAM)	10
2.3.1	Enquadramento	10
2.3.2	Equações de Navier-Stokes médias no espaço e no tempo	12
3	Instalações laboratoriais e instrumentação	17
3.1	Introdução	17
3.2	Instalações laboratoriais	19
3.3	Instrumentação	21
3.4	<i>Particle Image Velocimetry</i> (PIV)	25
3.4.1	Princípios e fundamentos	25
3.4.2	Variáveis para aquisição de dados	29
3.4.3	Partículas traçadoras (<i>seeding</i>)	30
4	Caracterização dos ensaios e procedimento experimental	35
4.1	Caracterização dos ensaios	35
4.1.1	Considerações gerais	35

4.1.2	Preparação do canal	36
4.1.3	Zonas de medição	39
4.1.4	Topografia	41
4.1.5	Superfície livre	43
4.1.6	Função de vazios	47
4.2	Procedimento experimental	47
5	Escoamento médio temporal	53
5.1	Considerações gerais	53
5.2	Velocidades instantâneas	53
5.3	Velocidades médias temporais e tensões tangenciais de Reynolds	54
5.4	Perfis de escoamento médio temporal	63
6	Escoamento médio espaço-temporal	67
6.1	Perfis de média dupla espaço-temporal	67
6.2	Alturas de influência	73
6.3	Normalização de perfis	77
6.3.1	Considerações gerais	77
6.3.2	Factor de adimensionalização U	78
6.3.3	Factor de adimensionalização $\sqrt{g_x H}$	80
6.3.4	Factor de adimensionalização C	81
6.3.5	Discussão de Resultados	83
7	Conclusões e trabalho futuro	85

Lista de Tabelas

2.1	Termos e significados físicos da equação DANS.	16
4.1	Parâmetros de caracterização dos ensaios experimentais.	36
4.2	Zonas e posições de medição para cada ensaio.	40
4.3	Posição longitudinal e média da cota registada de cada medição transversal na zona de medição do leito rugoso.	43
4.4	Caracterização média da superfície livre para cada ensaio.	46
4.5	Factor de adimensionalização H	47
4.6	Valores do factor de calibração, F_c ($\times 10^{-3}$ cm/pixel).	50
4.7	Variáveis para cada tipo de ensaio.	51
5.1	Mapas de velocidade média temporal para o ensaio A1 em unidades SI (m/s). . . .	57
5.2	Mapas de velocidade média temporal para o ensaio A2 em unidades SI (m/s). . . .	58
5.3	Mapas de velocidade média temporal para o ensaio R2 em unidades SI (m/s). . . .	59
5.4	Mapas de tensão tangencial de Reynolds para o ensaio A1 em unidades SI (Pa). . .	60
5.5	Mapas de tensão tangencial de Reynolds para o ensaio A2 em unidades SI (Pa). . .	61
5.6	Mapas de tensão tangencial de Reynolds para o ensaio R2 em unidades SI (Pa). . .	62
6.1	Factores de adimensionalização.	78

Lista de Figuras

1.1	Zona húmida coberta por vegetação (grande densidade de juncos) (Fonte: http://proandassociates.com/permit.htm).	1
2.1	Mapa em planta das flutuações de velocidade média (cm/s) de um escoamento em zona povoada por vegetação emersa e rígida. A seta representa o sentido do escoamento. (Adaptado de Ricardo 2009).	6
2.2	Ribeira de Sôr, Ponte de Sôr (Alto Alentejo). Foto por Paulo Monteiro (Fonte: http://www.trekearth.com/gallery/Europe/Portugal/South/Portalegre/).	7
2.3	Esquema da rugosidade das fronteiras: a) fronteira hidraulicamente lisa; b) fronteira de transição e c) fronteira hidraulicamente rugosa.	8
2.4	Série temporal de velocidades instantâneas $u(t)$ para um intervalo de tempo t e a sua decomposição em média temporal e flutuações instantâneas (Adaptado de Campbell 2005, p.60).	9
2.5	Decomposição de um sinal de velocidade médio temporal, na velocidade de média dupla e respectivas flutuações espaciais (Adaptado de Campbell 2005, p.63).	13
2.6	Representação esquemática das regiões com diferentes funções de vazios.	15
3.1	Vista geral do CRIV.	17
3.2	Planta e alçado lateral direito do CRIV, em cima e em baixo respectivamente (adaptado de Ricardo 2008 p.42).	18
3.3	Elementos do CRIV: a) paredes de vidro lateral; b) suporte móvel instalado no varão auxiliar e c) suporte de altura regulável.	19
3.4	Estrutura de entrada e saída do CRIV: a) conduta de PVC; b) estabilizador de superfície livre; c) orifícios de saída e d) comporta de jusante.	20
3.5	Circuito de recirculação do CRIV: a) conduta de PVC; b) conduta de ligação entre tanques; c) bomba centrífuga d) válvula de controlo e regulação do caudal e) caudalímetro digital.	20
3.6	Hidrómetro de ponta.	21

3.7	Componentes sistema de medição de laser: a) cabeça do laser; b) caixa de controle e fonte de alimentação e c) caixa de sistema de aquisição de dados Spider8®.	22
3.8	Componentes do sistema PIV: a) cabeça do laser na vertical apoiado no suporte móvel; b) gerador do laser; c) câmara CCD; d) caixa de sincronização e e) software DynamicStudio®.	23
3.9	Disparo de laser do sistema PIV.	23
3.10	Segurança no laboratório: a) óculos de protecção e b) sinalização à entrada do laboratório.	24
3.11	a) Panos pretos a cobrir o canal b) termómetro digital.	25
3.12	Exemplo de um registo fotográfico.	26
3.13	Representação esquemática da técnica de medição PIV.	26
3.14	Diagrama temporal para medições PIV utilizando uma câmara CCD de alta velocidade. O obturador da câmara está aberto para a linha superior (1) e fechado para a inferior (0).	27
3.15	Exemplo do mapa de correlação de um par de áreas de interrogação através do software DynamicStudio® (<i>Cross-correlation map</i>).	27
3.16	Mapas de vectores velocidade: instantânea para o par de imagens da Figura 3.15 e b) média temporal para 486 imagens registadas durante uma aquisição.	29
3.17	Diagramas de espalhamento de luz para partículas de vidro esféricas na água com diâmetros: a) 1 μm e b) 10 μm (Adaptado de Raffel <i>et al.</i> 1998 p.20).	31
3.18	a) Partículas traçadoras artificiais adicionadas ao escoamento (PSP) b) Imagem ao microscópio digital das partículas traçadoras artificiais (PSP).	32
3.19	Rácio r_p em função da frequência para partículas PSP (a azul) e DECOSOFT 60 (a vermelho), com diâmetros médios de: 50 μm e 60 μm respectivamente.	33
4.1	a) Aspecto do material utilizado para a construção do leito de areia e b) respectiva curva granulométrica (adaptado de Nogueira 2007, p.24).	36
4.2	Leito de areia: a) esquema do leito de areia utilizado nos ensaios laboratoriais; b) pormenor do leito de areia e c) pormenor real do leito em zona povoada pelas hastes.	37
4.3	Material utilizado para a construção do leito rugoso.	38
4.4	Elementos para fixação das hastes: a) hastes; b) suportes de PVC e c) sistema de fixação das hastes para o leito rugoso.	38
4.5	Leito rugoso: a) esquema do leito rugoso utilizado nos ensaios laboratoriais; b) pormenor do leito rugoso e c) pormenor real do leito em zona povoada pelas hastes.	39
4.6	a) Soleira a montante do leito e b) soleira a jusante do leito.	39

4.7	Esquema da área de visão captada pela câmara para cada ensaio: a) ensaio A1; b) ensaio A2 e c) ensaio R2. A seta representa o sentido do escoamento.	40
4.8	Aspecto do leito de areia e do efeito da erosão localizada para o ensaio A2.	41
4.9	Perfis longitudinais do leito de areia de montante para jusante (Adaptado de Ricardo 2008).	41
4.10	Perfis longitudinais do leito rugoso de montante para jusante, nas posições laterais da esquerda para a direita: a) 15.0 cm; b) 20.4 cm e c) 25.8 cm.	42
4.11	Perfis transversais do leito rugoso medidos da esquerda para a direita na zona de medições nas posições: a) 8.317 m (M) e b) 8.352 m (J).	44
4.12	Perfis longitudinais da altura do escoamento e respectiva linha de tendência para os ensaios: a) A1; b) A2 e c) R2.	45
4.13	Série temporal da variação de altura de escoamento na posição média lateral (20.4 cm) e a 8.301 m do início do canal.	46
4.14	Perfis transversais da altura do escoamento para valores máximos (■), mínimos (▲) e médios (●), na zona de medição, posições: a) $x = 8.301$ m e b) $x = 8.365$ m.	46
4.15	Função de vazios para os ensaios: a) A1; b) A2; c) R2 e d) para a sobreposição da função de vazios dos três ensaios.	48
4.16	Nível digital.	49
4.17	Imagem da régua de calibração para o ensaio R2, posição lateral 25.4 cm. A linha a tracejado representa a distância Δd	49
4.18	Definição de variáveis de aquisição no sistema de controlo do DynamicStudio®.	50
4.19	Perfis de velocidade longitudinal média espaço-temporal, $\langle \bar{u} \rangle$, para diferentes valores de tempo entre impulsos.	51
4.20	Sistema de introdução de <i>seeding</i> no canal: a) funil; b) malhas de pequena dimensão.	52
5.1	Janelas do software DynamicStudio® para definição de: a) áreas de interrogação e b) tipo de validação.	54
5.2	Exemplo de imagem captada pela câmara para o ensaio R2 (M) na posição 3: a) mascarada b) com ponteiro (cuja ponta se encontra a 7.07 cm do fundo do canal).	55
5.3	Diagrama de polígonos de Voronoï com a localização espacial dos perfis e a sua área de influência para os ensaios: a) A1 (687 perfis); b) A2 (622 perfis) e c) R2 (522 perfis).	64
5.4	Quantidades médias temporais dos 687 perfis aplicados na DAM para o ensaio A1.	65
5.5	Quantidades médias temporais dos 622 perfis aplicados na DAM para o ensaio A2.	66
5.6	Quantidades médias temporais dos 522 perfis aplicados na DAM para o ensaio R2.	66

6.1	Velocidade média segundo as componentes: a) longitudinal e b) vertical.	68
6.2	Gradiente vertical da velocidade longitudinal média.	69
6.3	Tensão normal de Reynolds média segundo as componentes: a) longitudinal e b) vertical.	69
6.4	Tensão normal dispersiva média segundo as componentes: a) longitudinal e b) vertical.	70
6.5	Relação entre as tensões normais dispersivas (Figura 6.4 a)) e normais de Reynolds (Figura 6.3 a)) na direcção longitudinal.	71
6.6	Tensão tangencial: a) de Reynolds média e b) dispersiva média.	71
6.7	Sobreposição das tensões tangenciais dispersivas (a vermelho) e de Reynolds (a azul) para os ensaios: a) A1; b) A2 e c) R2.	72
6.8	Perfil da diferença das tensões tangenciais dispersivas e de Reynolds para cada ensaio.	73
6.9	Esquema da distribuição de influência do leito, hastes e superfície livre para os ensaios: a) A1; b) A2 e c) R2, com o respectivo perfil de velocidade longitudinal.	74
6.10	Perfil de média dupla espaço-temporal da tensão normal dispersiva na direcção longitudinal (ensaio R2).	75
6.11	Percentagens das alturas de escoamento para cada um dos ensaios influenciadas pelo leito, hastes e superfície livre.	76
6.12	Percentagem da altura de influência: i) do leito que também é influenciada pelas hastes; ii) da superfície livre que também é influenciada pelas hastes e iii) das hastes apenas influenciada por hastes.	76
6.13	Tensão normal de Reynolds média segundo as componentes: a) longitudinal e b) vertical.	78
6.14	Tensão normal dispersiva média segundo as componentes: a) longitudinal e b) vertical.	79
6.15	Tensão tangencial: a) de Reynolds média e b) dispersiva média.	79
6.16	Tensão normal de Reynolds média segundo as componentes: a) longitudinal e b) vertical.	80
6.17	Tensão normal dispersiva média segundo as componentes: a) longitudinal e b) vertical.	80
6.18	Tensão tangencial: a) de Reynolds média e b) dispersiva média.	81
6.19	Tensão normal de Reynolds média segundo as componentes: a) longitudinal e b) vertical.	81
6.20	Tensão normal dispersiva média segundo as componentes: a) longitudinal e b) vertical.	82

6.21 Tensão tangencial: a) de Reynolds média e b) dispersiva média.	82
---	----

Simbologia

Símbolo	Descrição	Dimensão
A_f	Área ocupada por fluido	$[L^2]$
A_k	Área de influência de (x_k, y_k) pertencente ao sub-domínio convexo Ω	$[L^2]$
A_0	Área total	$[L^2]$
C	Escala de colapso	$[ML^{-1}T^{-2}]$
D_{50}	Diâmetro mediano do material do fundo	$[L]$
d	Diâmetro das hastes	$[L]$
d_p	Diâmetro médio das partículas de <i>seeding</i>	$[L]$
F_c	Factor de calibração para converter unidades da câmara em unidades SI	$[-]$
f_c	Frequência das estruturas turbulentas do escoamento do fluido	$[T^{-1}]$
g	Módulo da aceleração gravítica	$[LT^{-2}]$
g_i	Componente da aceleração gravítica na direcção i	$[LT^{-2}]$
H	Altura do escoamento influenciado pelas hastes	$[L]$
h	Altura do escoamento	$[L]$
k_s	Escala geométrica dos elementos rugosos	$[L]$
L_x	Comprimento do domínio Ω	$[L]$
L_y	Largura média do domínio Ω	$[L]$
N_k	Número de sub-domínios à cota z	$[-]$
NI	Número de mapas instantâneos recolhidos em cada instância de aquisição	$[-]$
N_t	Número de total de cotas medidas	$[-]$
N_z	Número de cotas medidas cuja cota é inferior a z	$[-]$
n	Número de hastes por unidade de área	$[L^{-2}]$
n_i	Componente normal do vector unitário normal à interface sólido líquido dirigida da parte sólida para a parte líquida	$[-]$
p	Pressão local	$[ML^{-1}T^{-2}]$
$\langle \bar{p} \rangle$	Pressão média temporal e espacial	$[ML^{-1}T^{-2}]$
p'	Flutuação turbulenta da pressão	$[ML^{-1}T^{-2}]$
\bar{p}	Pressão média temporal	$[ML^{-1}T^{-2}]$
Q	Caudal	$[L^3T^{-1}]$

Símbolo	Descrição	Dimensão
q	Diâmetro normalizado característico do espalhamento da luz pelas partículas traçadoras	$[-]$
Re	Número de Reynolds	$[-]$
Re_*	Número de Reynolds característico da rugosidade	$[-]$
Re_p	Número de Reynolds característico das hastes	$[-]$
r_p	Rácio que traduz a aptidão das partículas de <i>seeding</i> para seguir um fluido em movimento	$[-]$
S_{ar}	Área ocupada por ar na área de controlo	$[L^2]$
S_b	Área ocupada por leito na área de controlo	$[L^2]$
S_{int}	Superfície de interface entre a parte sólida e a parte líquida do volume de controlo	$[L^2]$
S_s	Área ocupada por hastes na área de controlo	$[L^2]$
s	Espaçamento médio entre hastes	$[L]$
$s^{(p)}$	Densidade das partículas de <i>seeding</i>	$[-]$
$s^{(w)}$	Densidade da água	$[-]$
T	Período	$[T]$
t	Tempo	$[T]$
u	Componente da velocidade na a direcção longitudinal	$[LT^{-1}]$
u_*	Velocidade de atrito	$[LT^{-1}]$
u_i	Componente da velocidade segundo a direcção i	$[LT^{-1}]$
$u_i^{(I)}$	Componente i do vector velocidade na interface sólido/líquido	$[LT^{-1}]$
\bar{u}	Velocidade longitudinal média temporal	$[LT^{-1}]$
u'	Flutuação turbulenta da velocidade longitudinal	$[LT^{-1}]$
$\tilde{u} \equiv \bar{\tilde{u}}$	Flutuação espacial da velocidade longitudinal média	$[LT^{-1}]$
$\langle \bar{u} \rangle$	Velocidade longitudinal média temporal e espacial	$[LT^{-1}]$
$[\bar{u}]$	Média na coluna de água da velocidade longitudinal média temporal	$[LT^{-1}]$
$[\langle \bar{u} \rangle]$	Média na coluna da velocidade longitudinal média temporal e espacial	$[LT^{-1}]$
U	Velocidade longitudinal média temporal e espacial na coluna de água H	$[LT^{-1}]$
V	Módulo da velocidade do escoamento	$[LT^{-1}]$
V_p	Módulo da velocidade das partículas de <i>seeding</i>	$[LT^{-1}]$
v	Componente da velocidade na a direcção transversal	$[LT^{-1}]$
w	Componente da velocidade na a direcção vertical	$[LT^{-1}]$
\bar{w}	Velocidade longitudinal média temporal	$[LT^{-1}]$
w'	Flutuação turbulenta da velocidade vertical	$[LT^{-1}]$
$\tilde{w} \equiv \bar{\tilde{w}}$	Flutuação espacial da velocidade vertical média temporal	$[LT^{-1}]$
$\langle \bar{w} \rangle$	Velocidade vertical média temporal e espacial	$[LT^{-1}]$
x	Distância longitudinal	$[L]$

Símbolo	Descrição	Dimensão
z	Distância vertical	[L]
Δd	Distância	[L]
Δt	Intervalo de tempo entre impulsos	[T]
δ_ν	Espessura da camada limite	[L]
$\delta^{(i)}$	Função que toma o valor 1 na zona i e é nula fora desta zona	[−]
λ	Comprimento de onda da luz incidente	[L]
λ_t	Comprimento de onda das estruturas turbulentas	[L]
μ	Viscosidade dinâmica da água	[ML ^{−1} T ^{−1}]
ν	Viscosidade cinemática da água	[L ² T ^{−1}]
ρ	Massa volúmica da água	[ML ^{−3}]
$-\rho\tilde{u}\tilde{w}$	Tensão tangencial dispersiva	[ML ^{−1} T ^{−2}]
$-\rho\overline{u'w'}$	Tensão tangencial de Reynolds	[ML ^{−1} T ^{−2}]
τ_{Re}	Tensão tangencial de Reynolds	[ML ^{−1} T ^{−2}]
ψ	Função de vazios	[−]
$\psi^{(i)}$	Função de vazios na zona i	[−]
ϕ	Fracção sólida no volume de controlo	[−]
Ω	Domínio rectangular cuja área é $L_x \times L_y$ paralelo a um plano definido por $z=\text{constante}$	[−]
Ω_k	Sub-domínio convexo pertencente ao domínio Ω	[−]
ξ_1	Coordenada segundo a direcção x dos pontos ocupados pelo fluido	[L]
ξ_2	Coordenada segundo a direcção y dos pontos ocupados pelo fluido	[L]

Acrónimos e abreviações

Acrónimo	Descrição
CCD	<i>Charge-couple device</i> (Dispositivo de carga acoplado)
CRIV	Canal de recirculação e inclinação variável
DAM	Metodologia de média dupla espaço-temporal
DANS	Equações de Navier-Stokes médias no espaço e no tempo
PIV	<i>Particle image velocimetry</i>
PSP	<i>Polyamide Seeding Particles</i>
PVC	Poli-cloreto de vinilo
RANS	Equações de Navier-Stokes médias no tempo
SI	Sistema Internacional
YAG	<i>Yttrium Aluminium Garnet</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

A vegetação desempenha um papel fundamental nos ecossistemas fluviais assegurando a manutenção do equilíbrio ambiental, através da sua função hidrológica, de estabilização do fundo e das margens e depuração do escoamento, como também a protecção da biodiversidade, pela sua função ecológica.

Os caules de vegetação que protegem planícies de inundação e zonas húmidas (Figura 1.1) influenciam a velocidade média e altura do escoamento (Kadlec 1990, Yen 2002 e Tanino & Nepf 2008); a capacidade de transporte de sedimentos, nutrientes e contaminantes (Lopez & García 1998, Yen 2002, Nepf & Vivoni 1999 e Tanino & Nepf 2008); a manutenção da qualidade da água por filtragem de nutrientes na coluna de água (White & Nepf 2008); a intensidade e difusão turbulentas (Nepf 1999); entre outros parâmetros hidráulicos.

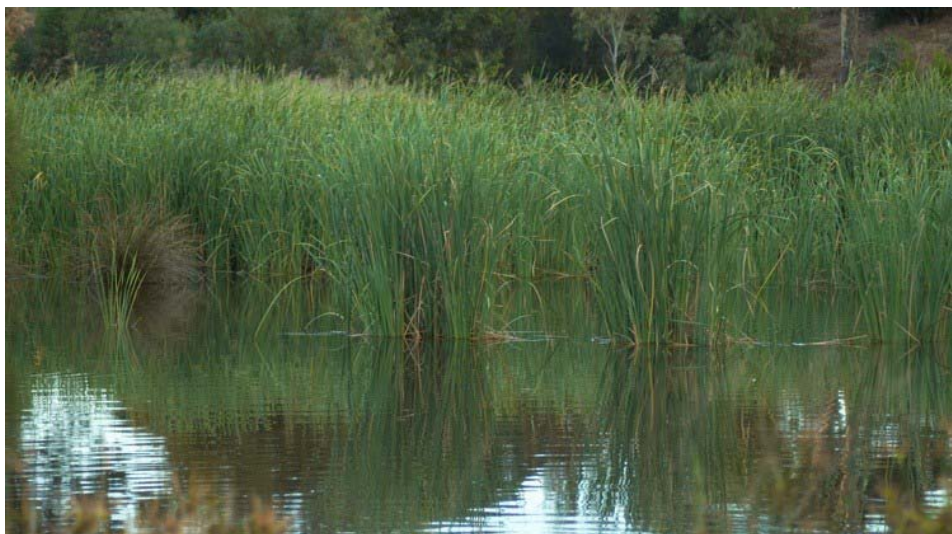


Figura 1.1: Zona húmida coberta por vegetação (grande densidade de juncos) (Fonte: <http://proandassociates.com/permit.htm>).

Existe um maior risco de inundação para uma maior resistência hidráulica num curso de água (Kadlec 1990), sendo importante conhecer qual o aumento de resistência hidráulica para um aumento de densidade de vegetação, e em particular, compreender como varia a magnitude relativa das forças que actuam junto ao leito e junto aos caules com a densidade de vegetação (Raupach 1992).

É de extrema importância adoptar uma visão holística sobre o comportamento e a fenomenologia de escoamentos condicionados pela presença de vegetação tanto para aplicações de engenharia (por exemplo estimativas de níveis de cheias) como ecológicas (por exemplo restauração fluvial).

Têm sido realizados vários estudos laboratoriais, de campo e numéricos com o objectivo de contribuir para o desenvolvimento de novas ferramentas que ajudem engenheiros e cientistas a decodificar a complexidade hidrodinâmica deste tipo de escoamentos e a quantificar as forças de arrastamento e coeficientes de difusão de poluentes. Esta questão é um problema de longa data e ainda hoje não é completamente conhecida.

Esta dissertação enquadra-se no projecto PTDC/ECM/099752/2008 financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia e surge em seguimento do trabalho desenvolvido por Ricardo 2008.

1.2 Objectivo

Neste estudo pretende-se: i) caracterizar experimentalmente, à escala do espaço inter-hastes, o escoamento em zonas povoadas com vegetação emersa e rígida e ii) procurar as escalas geométrica e cinemática que normalizam as variáveis intervenientes na equação de conservação da quantidade de movimento.

1.3 Metodologia

O estudo é baseado nos princípios fundamentais da hidrodinâmica de escoamentos turbulentos cuja escala fundamental é o espaçamento médio entre hastes, caracterizando o escoamento em volumes de controlo definidos por essa escala geométrica. Inicia-se com um trabalho teórico para seleccionar as variáveis relevantes.

O trabalho experimental consiste em simular laboratorialmente, em condições controladas, um escoamento em leito com vegetação emersa rígida. É recolhida informação prévia e detalhada das condições dos ensaios laboratoriais: topografia do leito e caracterização da superfície livre.

Recorrendo a uma técnica de medição pouco intrusiva (PIV) obtêm-se campos de velocidade instantâneos para um conjunto de três ensaios distintos. Nestes ensaios serão testadas duas densidades de vegetação e dois tipos de leito diferentes.

O tratamento de dados consiste na aplicação da metodologia de dupla média (temporal e espacial), permitindo analisar velocidades e tensões (turbulentas e dispersivas) médias.

No sentido de compreender o comportamento hidrodinâmico no seio do escoamento, é feita uma discussão dos resultados, incluindo a análise da influência do leito, hastes e superfície livre no escoamento. A procura de uma escala característica para este tipo de escoamento, consiste na aplicação de três variáveis distintas.

1.4 Organização da dissertação

A continuação da presente dissertação está estruturada da seguinte forma:

- Capítulo 2: apresenta uma revisão sobre os trabalhos realizados no âmbito de escoamentos com vegetação. Introduce o conceito de metodologia de dupla média e o desenvolvimento das equações do movimento;
- Capítulo 3: apresenta as instalações laboratoriais, a instrumentação utilizada, incluindo uma detalhada descrição do sistema PIV;
- Capítulo 4: caracteriza detalhadamente os ensaios laboratoriais, incluindo as zonas onde foram efectuadas medições, a topografia dos leitos e a altura e gradiente da superfície livre. Também se determina a função de vazios para cada ensaio e descreve-se o procedimento experimental adoptado;
- Capítulo 5: apresenta o tratamento de dados realizado a partir dos campos de velocidade instantânea, passando por campos de velocidade média, até à obtenção dos perfis médios temporais que definem o escoamento para cada ensaio.
- Capítulo 6: apresenta o tratamento de dados e os resultados das variáveis que definem o comportamento do escoamento em termos espaço-temporais. Analisa a influência do leito, hastes e superfície livre na altura do escoamento para cada ensaio e mostra a aplicação de três escalas características distintas.
- Capítulo 7: aponta as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

NOTA: Nesta dissertação foi usada notação anglo-saxónica para a separação decimal.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

2.1 Escoamentos em leitos com vegetação

A presença de vegetação é frequente em diversos sistemas fluviais, entre os quais se encontram zonas de transição entre o meio terrestre e aquático como por exemplo, planícies de inundação, zonas húmidas ou junto a canais estuarinos. Nestes casos, o escoamento é complexo e dependente de factores ambientais e características morfológicas da vegetação (Yen 2002, Järvelä 2002 e Nikora *et al.* 2008).

De um modo geral, a introdução de uma barreira física num escoamento, imposta pelos caules e ramos das plantas, conduz a um aumento da sua resistência hidráulica (Kadlec 1990, Yen 2002 e Tanino & Nepf 2008), promove a dispersão lateral forçando o escoamento a adquirir trajectórias tortuosas, aumentando a intensidade turbulenta (Nepf 1999 e White & Nepf 2003), que por sua vez reduz a capacidade de transporte de sedimentos e contribui para a acumulação de sedimentos, por redução das tensões junto ao leito (Lopez & García 1998, Nepf & Vivoni 1999 e Yen 2002).

À escala macroscópica deste tipo de escoamentos os fortes gradientes na zona entre hastes não é perceptível e o escoamento é caracterizado como sendo dispersivo (Nepf 1999). No entanto, à escala do espaço médio entre elementos da vegetação, estes escoamentos apresentam uma grande heterogeneidade espacial. A Figura 2.1 apresenta um mapa de flutuações de velocidade média de um escoamento entre hastes emersas, cilíndricas e rígidas, onde é possível verificar a grande variabilidade espacial característica deste tipo de escoamentos.

Segundo White & Nepf 2003, a maior heterogeneidade espacial devido à interacção do escoamento com as hastes provém: i) da zona instável de recirculação junto de cada haste e ii) do abrandamento da velocidade atrás de cada haste que se estende para jusante a uma distância na ordem do espaçamento entre hastes. Dada a sua grande heterogeneidade espacial, é adequado que a caracterização do escoamento à escala do espaçamento médio entre os elementos de vegetação seja feita com base em médias temporais e espaciais (Nikora 2008, White & Nepf 2008 e Tanino & Nepf 2008).

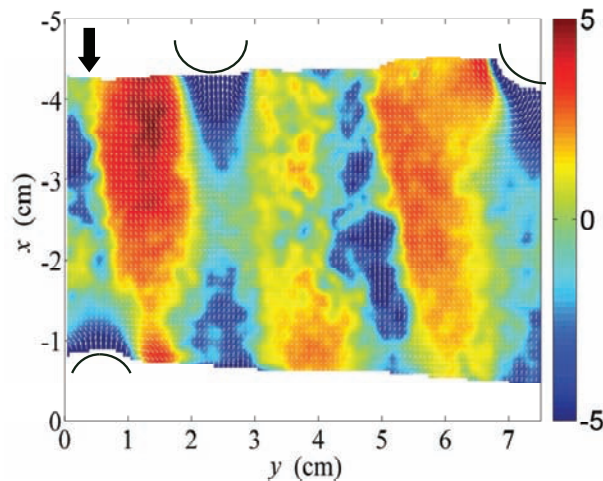


Figura 2.1: Mapa em planta das flutuações de velocidade média (cm/s) de um escoamento em zona povoada por vegetação emergsa e rígida. A seta representa o sentido do escoamento. (Adaptado de Ricardo 2009).

Yen 2002 defende que a melhor forma de compreender a resistência de escoamentos povoados por vegetação, passa por compreender a sua hidrodinâmica com a ajuda do conhecimento dos pressupostos e limitações das leis universais de distribuição da velocidade, incluindo a lei logarítmica. Esta abordagem oferece uma base matemática para caracterizar o escoamento e o seu processo de transporte de sedimentos. No entanto, a aplicação de leis que normalizem as quantidades turbulentas ainda não é uma questão clara para escoamentos com grande heterogeneidade espacial (Manes *et al.* 2007).

Apresenta-se de seguida um resumo dos principais trabalhos desenvolvidos na temática dos escoamentos em leitos com vegetação. Nas últimas décadas, vários trabalhos de investigação têm sido levados a cabo para analisar o efeito da vegetação aquática na resistência dos escoamentos e no processo de transporte de sedimentos. Na natureza, a vegetação presente nos cursos de água abrange uma ampla gama de variedade, desde gramíneas flexíveis, a arbustos densos, até árvores de pequeno porte. Assim, do ponto de vista hidrodinâmico, o caso mais simples de estudo do efeito conjunto da vegetação passa por analisar escoamentos sob a presença de elementos rígidos numa distribuição uniforme (Yen 2002).

A maior parte dos trabalhos realizados baseiam-se em ensaios laboratoriais, onde se simulam as condições de escoamentos com vegetação rígida (Nepf 1999, Ghisalberti & Nepf 2004, James *et al.* 2004, White & Nepf 2008, Ricardo 2008 e Tanino & Nepf 2008) e com vegetação flexível (Nepf & Vivoni 1999, Järvelä 2002, Carollo *et al.* 2005).

Algumas publicações basearam-se em trabalhos de campo baseando-se em medições "*in situ*", sobre vários tipos de vegetação em condições naturais (Kadlec 1990 e Nikora *et al.* 2008). Lopez & García 1998 realizaram um estudo computacional para obter a informação no sentido de estimar como se processa o transporte de sedimentos em suspensão no escoamento. Yen 2002 apresenta um estudo teórico onde enumera vários modelos, domínios de aplicação e as suas limitações.

2.2 Escoamentos turbulentos e camada limite

Os escoamentos com superfície livre que se encontram na natureza, são quase sempre turbulentos e muitas vezes em leitos rugosos, como o exemplo que se apresenta na Figura 2.2.

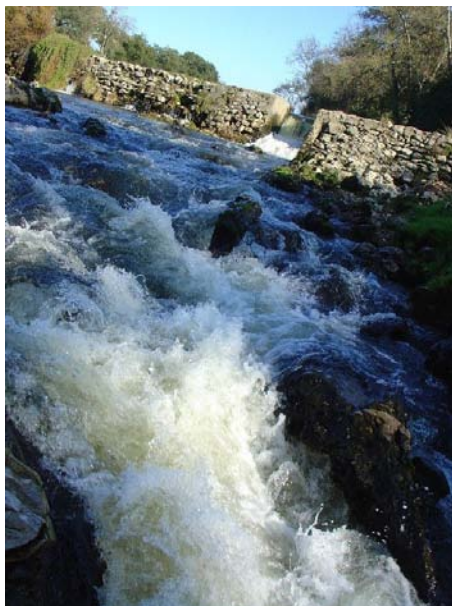


Figura 2.2: Ribeira de Sôr, Ponte de Sôr (Alto Alentejo). Foto por Paulo Monteiro (Fonte: <http://www.trekearth.com/gallery/Europe/Portugal/South/Portalegre/>).

Apesar deste trabalho consistir no estudo de um escoamento no interior de zonas povoadas por vegetação rígida é conveniente apresentar uma breve descrição sobre escoamentos de leitos sem vegetação com camada limite completamente desenvolvida, a fim de realçar o papel do leito nos escoamentos turbulentos. Designa-se de camada limite a região onde se manifesta o efeito da condição de não escorregamento imposta pelo fundo. Ao longo de um escoamento esta camada desenvolve-se aumentando continuamente de espessura até atingir a superfície livre.

Os leitos, ou mais genericamente, as fronteiras de um escoamento podem ser classificadas em função da sua rugosidade. Esta classificação é feita com base no valor do número de Reynolds característico, Re_* (Brederode 1997, pp. 283-291), que se exprime da seguinte forma:

$$Re_* = \frac{u_* k_s}{\nu} \quad (2.1)$$

onde $u_* = \sqrt{\tau_b/\rho}$ é a velocidade de fricção (ou velocidade de atrito), τ_b é a tensão de arrastamento no fundo (a força que o escoamento exerce sobre o fundo por unidade de área em planta), ρ é a massa volúmica do fluido, k_s é a escala geométrica dos elementos rugosos (também designada de rugosidade equivalente de Nikuradse) e ν é a viscosidade cinemática do fluido.

O número de Reynolds característico relaciona duas escalas, a escala dos elementos rugosos k_s e a escala da sub-camada viscosa. A sub-camada viscosa representa a zona junto à fronteira onde se fazem sentir os efeitos da viscosidade e a sua espessura vem expressa por (Brederode 1997, pp. 290-291):

$$\delta_\nu = 11.3 \frac{\nu}{u_*} \quad (2.2)$$

Com base no número de Reynolds anteriormente definido, podem identificar-se três tipos de fronteiras:

- Fronteiras hidraulicamente lisas: para valores de $Re_* < 5$, consegue identificar-se uma sub-camada viscosa (de espessura δ_ν) onde a influência da rugosidade do grão é desprezável para a determinação da resistência ao escoamento. A superfície embora geometricamente rugosa comporta-se do ponto de vista do escoamento como lisa (Figura 2.3 a));
- Fronteiras de transição: para valores na gama intermédia $5 < Re_* < 70$ cuja sub-camada viscosa está presente em grande parte da área da fronteira e onde os elementos rugosos têm influência não desprezável. As características do escoamento são dependentes de ambos (Figura 2.3 b));
- Fronteira hidraulicamente rugosa: para valores de $Re_* > 70$, onde a produção de turbulência e a resistência ao escoamento são influenciados pela dimensão dos elementos rugosos. Os efeitos da rugosidade são de tal forma elevados que a sub-camada viscosa deixa de existir e o escoamento processa-se independentemente da viscosidade (Figura 2.3 c)).

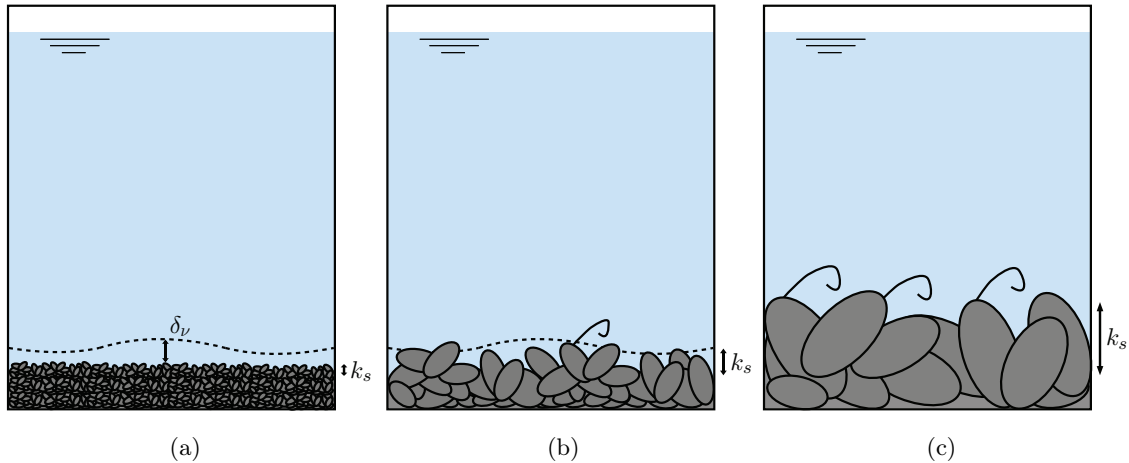


Figura 2.3: Esquema da rugosidade das fronteiras: a) fronteira hidraulicamente lisa; b) fronteira de transição e c) fronteira hidraulicamente rugosa.

No caso de leitos com fronteira hidraulicamente lisa e de transição, não existem heterogeneidades espaciais significativas e o seu escoamento pode ser caracterizado pelas

conhecidas equações de Navier-Stokes médias no tempo (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes* na literatura inglesa; doravante usa-se o acrónimo RANS para referir estas equações).

Antes de avançar é pertinente identificar o sistema de coordenadas adoptado ao longo deste estudo. O sistema de coordenadas é definido pelas direcções (x, y, z) onde x assume a direcção longitudinal ao escoamento, y a direcção transversal e z a direcção normal ao leito. As componentes de velocidade para este sistema são (u, v, w) , respectivamente. Adoptou-se a notação de Einstein para simplificar a escrita de somatórios.

Segue-se uma breve explicação sobre as RANS, que têm origem nas equações de Navier-Stokes.

As equações de Navier-Stokes constituem relações fundamentais e o ponto de partida para o estudo de escoamentos de fluidos Newtonianos, expressando a conservação da quantidade de movimento. Para fluidos incompressíveis as equações de Navier-Stokes escrevem-se da seguinte forma (e.g. Schlichting 1968, p.65):

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2.3)$$

onde, p é a pressão local do fluido, u_i é a componente da velocidade na direcção i , g_i é a componente da aceleração gravítica na direcção i .

Para problemas de engenharia cujo escoamento apresenta escalas turbulentas que podem variar até à ordem de grandeza do diâmetro das moléculas do fluido, a quantidade de informação e o tempo de cálculo consumido justificam a inviabilidade da utilização destas equações (Pope 2000, pp.8, 34-37).

Os escoamentos turbulentos são caracterizados por variações instantâneas de velocidade e pressão, pelo que no caso dos escoamentos permanentes as variáveis instantâneas do escoamento podem ser escritas em termos de média temporal e as respectivas flutuações ao longo do tempo. Esta decomposição é designada por decomposição de Reynolds, exemplificada na Figura 2.4 para uma série temporal de velocidades instantâneas $u(t)$.

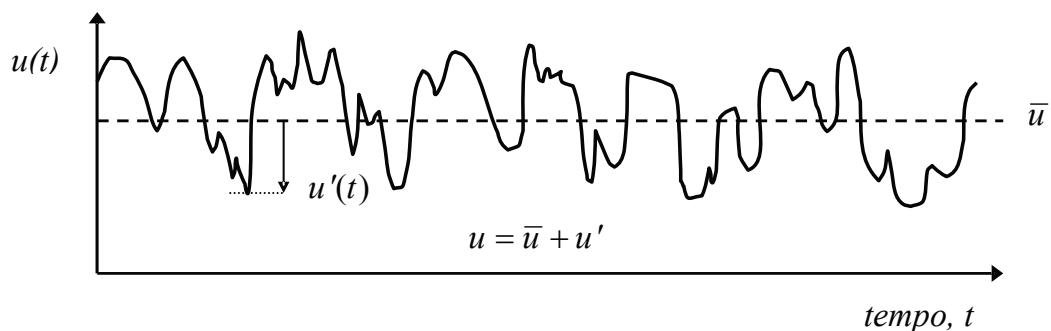


Figura 2.4: Série temporal de velocidades instantâneas $u(t)$ para um intervalo de tempo t e a sua decomposição em média temporal e flutuações instantâneas (Adaptado de Campbell 2005, p.60).

A decomposição de Reynolds para uma variável instantânea genérica, θ , vem expressa

por:

$$\theta(x, y, z, t) = \bar{\theta}(x, y, z) + \theta'(x, y, z, t) \quad \text{em que } \overline{\theta'} = 0 \quad (2.4)$$

onde a barra superior representa a média temporal ($\bar{\theta}$) e a plica representa as flutuações temporais (θ').

Ao se introduzir a decomposição de Reynolds na equação (2.3), e após aplicação do operador média temporal obtêm-se as RANS (e.g. Finnigan 2000 e Pope 2000, p.83):

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (2.5)$$

A diferença entre as equações (2.3) e (2.5) é o aparecimento do termo das tensões de Reynolds ($-\rho \overline{u'_i u'_j}$). Este termo surge devido à não linearidade dos termos da aceleração convectiva.

As RANS têm sido utilizadas como ferramenta de modelação e interpretação numérica e experimental de resultados de escoamentos turbulentos. No entanto, em situações que apresentam um escoamento médio temporal com elevada tridimensionalidade e heterogeneidade espacial, as RANS não traduzem com rigor o seu comportamento especialmente junto a fronteiras irregulares (Nikora *et al.* 2007a, Aberle *et al.* 2008 e Finnigan & Shaw 2008), surgindo assim a necessidade de transformar as equações de Navier-Stokes não apenas por intermédio de médias temporais mas também por intermédio de médias espaciais.

2.3 Metodologia de média dupla espaço-temporal (DAM)

2.3.1 Enquadramento

A metodologia de média dupla espaço-temporal (*Double-Average Methodology* na literatura inglesa) permite desenvolver as equações de conservação que definem um escoamento, em termos de variáveis médias temporais e espaciais. Neste processo surgem as tensões dispersivas, da resistência de forma e da resistência viscosa (*form-induced stresses*, *form drag* e *viscous drag* na literatura inglesa, respectivamente, Campbell 2005, pp.43-44, Nikora *et al.* 2007a, Pokrajac *et al.* 2008). Doravante utiliza-se o acrónimo DAM para referir esta metodologia.

Nos próximos sub-capítulos será analisado com maior detalhe o aparecimento destes termos nas equações de conservação do movimento. É feita uma análise concreta associando um modelo de escoamento turbulento em presença de hastes rígidas, cilíndricas e emersas. De seguida apresenta-se uma descrição dos trabalhos já desenvolvidos com esta metodologia.

A partir dos anos 60 iniciaram-se as primeiras aplicações da metodologia de dupla média com o desenvolvimento do estudo de escoamentos com múltiplas fases e de escoamentos subterrâneos (Whitaker 1967, Gray & Lee 1977).

O conceito de dupla média foi implementado aos escoamentos atmosféricos por Wilson & Shaw 1977 que descreveram o comportamento deste tipo de escoamentos sobre a copa das árvores. Raupach & Shaw 1982 formalizaram o procedimento de média espacial, descrevendo as propriedades do operador de média considerando áreas segundo planos horizontais que intersectam a vegetação. Em analogia, a utilização de volumes para aplicação da média espacial em extensivas fatias de espessura infinitesimal conduzem aos mesmos resultados (Nikora *et al.* 2001, Campbell 2005).

Seguiu-se o desenvolvimento desta técnica, ainda em escoamentos atmosféricos sobre diversos tipos de vegetação (Raupach *et al.* 1986, Raupach *et al.* 1996, Finnigan 2000, Poggi & Katul 2008, Finnigan & Shaw 2008).

Na hidráulica dos escoamentos com superfície livre, a primeira publicação de utilização da DAM surgiu com Smith & McLean 1977 que analisaram o escoamento sobre dunas de grande amplitude relativa (até 100 metros de comprimento por três de altura).

Gimenez-Curto & Corniero Lera 1996 investigaram as oscilações de um escoamento turbulento sobre superfícies rugosas e incluíram o termo das tensões dispersivas para descrever as perturbações espaciais do escoamento médio temporal. Destaca-se também o trabalho Lopez & García 1998 onde foi aplicada a DAM a escoamentos povoados por vegetação rígida, avaliando a capacidade de transporte de sedimentos em suspensão no escoamento.

Mais recentemente, foram feitos progressos para caracterizar com detalhe os procedimentos da DAM aplicada à hidráulica ambiental (Nikora *et al.* 2001, Nikora *et al.* 2004, Campbell 2005, Manes *et al.* 2007, Pokrajac *et al.* 2008, Aberle *et al.* 2008, Ferreira *et al.* 2008).

Segundo Nikora *et al.* 2001, as equações de dupla média de conservação do movimento (DANS) devem ser a base para determinar o comportamento hidrodinâmico de escoamentos com superfície livre em canais de fundo rugoso ou irregular, especialmente nos que apresentam uma submergência relativamente pequena. Acresce que as principais vantagens da DAM são: i) a existência de uma relação consistente entre a média espacial dos parâmetros da geometria do fundo e a média temporal e espacial das variáveis do escoamento; ii) o aparecimento do termos das tensões dispersivas e da resistência de forma como resultado de uma derivação rigorosa; iii) a possibilidade de efectuar considerações e parametrizações com base nas variáveis médias, temporais e espaciais; iv) a possibilidade de repartir de forma consistente as escalas dos parâmetros de rugosidade e das propriedades do escoamento no caso de existirem vários tipos de rugosidade.

Campbell 2005 verificou a aplicabilidade da DAM estudando um escoamento segundo um leito rugoso, mas geometricamente simples (utilizando barras de secção quadrada) através de uma série de ensaios laboratoriais. Concluiu que a DAM é uma ferramenta poderosa para compreender o mecanismo de interacção entre o escoamento em canais com superfície livre e a rugosidade do leito.

Nikora *et al.* 2007a e Nikora *et al.* 2007b reuniram vários avanços na teoria que fun-

damenta a DAM, essencialmente no campo da hidráulica ambiental. Mostram vantagens, exemplos de aplicação e oportunidades futuras de investigação.

Pokrajac *et al.* 2008 e Aberle *et al.* 2008 salientaram a importância e significado das tensões dispersivas de escoamentos turbulentos sob leitos rugosos.

Uma eventual aplicação da DAM foi desenvolvida por Ferreira *et al.* 2008 ao caracterizar e quantificar a resistência do escoamento em canais com superfície livre e leitos não só porosos e rugosos como potencialmente móveis.

Ricardo 2008 dedicou-se ao estudo de escoamentos em zonas povoadas por vegetação emersa rígida. Desenvolveu trabalho laboratorial para caracterizar a resistência hidráulica de um escoamento turbulento sob a influência de duas densidades de vegetação diferentes. A DAM mostrou ser um instrumento fundamental de análise detalhada das propriedades de tais escoamentos.

2.3.2 Equações de Navier-Stokes médias no espaço e no tempo

A metodologia de média dupla espaço-temporal consiste na resolução das equações de Navier-Stokes médias no espaço e no tempo (*Double-Averaged Navier-Stokes* na literatura inglesa, invocado pelo acrónimo DANS).

As DANS obtêm-se a partir das RANS através de um processo idêntico ao que se usa para obter as RANS a partir das equações de Navier Stokes.

À semelhança da decomposição de Reynolds, pode definir-se uma decomposição espacial através do qual se escrevem as variáveis médias no tempo como a soma da média no tempo e no espaço dessa variável ($\langle \bar{\theta} \rangle$) com a flutuação espacial dos valores da média temporal ($\tilde{\theta}$). A equação (2.6) mostra o desenvolvimento segundo a média espacial, de uma variável genérica média temporal, $\bar{\theta}$.

$$\bar{\theta}(x, y, z) = \langle \bar{\theta} \rangle(z) + \tilde{\theta}(x, y, z) \quad (2.6)$$

A Figura 2.5 mostra a decomposição de um sinal de velocidade médio temporal desta forma.

Introduzindo a decomposição espacial nas RANS e aplicando a média espacial obtêm-se as DANS, tendo em conta alguns formalismos matemáticos.

O operador média espacial para um domínio espacial representativo, Ω , e para uma variável genérica média temporal, $\bar{\theta}$, é definido por (Raupach & Shaw 1982, Nikora *et al.* 2001, Ricardo 2008 e Ferreira *et al.* 2010):

$$\langle \bar{\theta} \rangle(z) = \frac{1}{A_f(z)} \int_{\Omega} \bar{\theta}(\xi_1, \xi_2, z) dS \quad (2.7)$$

onde $\bar{\theta}$ é definida num ponto que não seja ocupado pelos elementos sólidos, Ω é um domínio rectangular cuja área é $L_x \times L_y$, paralelo a um plano definido por $z = \text{constante}$ (assume-se

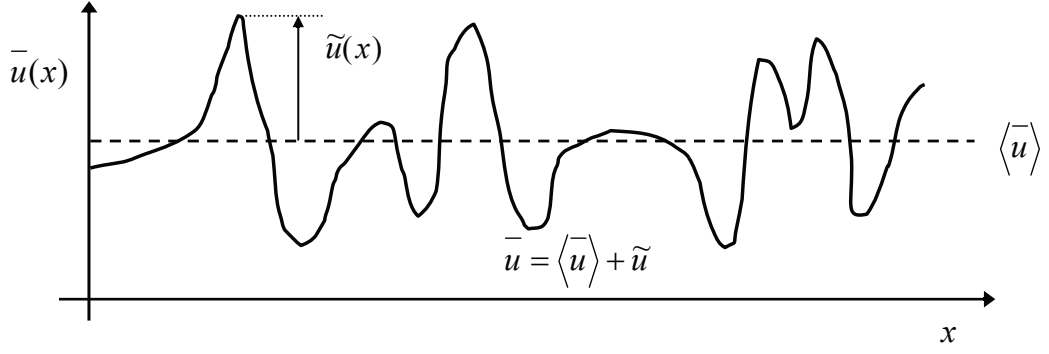


Figura 2.5: Decomposição de um sinal de velocidade médio temporal, na velocidade de média dupla e respectivas flutuações espaciais (Adaptado de Campbell 2005, p.63).

que é paralelo ao leito), $A_f(z)$ é a área ocupada por fluido no domínio Ω e as variáveis ξ_1 e ξ_2 são tais que $0 < \xi_1 < L_x$ e $0 < \xi_2 < L_y$ e correspondem às coordenadas, segundo a direcção x e y , dos pontos ocupados pelo fluido em que $\bar{\theta}$ está definido. As dimensões do domínio rectangular, Ω , definidas por L_x e L_y , devem ser relativamente largas quando comparadas com o comprimento de onda da distribuição espacial das variações da velocidade longitudinal junto ao fundo do canal (Ricardo 2008).

É preciso ter em conta que nos casos em que o volume de controlo é constituído por fluido e por elementos sólidos a propriedade comutativa entre operadores diferencial e média espacial não é válida (Wilson & Shaw 1977 e Raupach & Shaw 1982):

$$\left\langle \frac{\partial \theta}{\partial x} \right\rangle \neq \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial x} \quad (2.8)$$

Neste caso, é necessária a utilização de dois teoremas para obter a média espacial dos termos diferenciais (Campbell 2005, pp.67-68 e Nikora *et al.* 2007a). Esses teoremas são:

- Teorema da média espacial:

$$\left\langle \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right\rangle = \frac{1}{\psi} \frac{\partial \psi \langle \theta \rangle}{\partial x_i} - \frac{1}{V_f} \int \int_{S_{int}} \theta n_i dS \quad (2.9)$$

- Equação geral do transporte:

$$\left\langle \frac{\partial \theta}{\partial t} \right\rangle = \frac{1}{\psi} \frac{\partial \psi \langle \theta \rangle}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \int \int_{S_{int}} \theta u_i n_i dS \quad (2.10)$$

onde, θ é uma variável genérica do escoamento definida apenas no volume de fluido, V_f , S_{int} é a superfície de interface entre a parte sólida e a parte líquida do volume de controlo; n_i é a componente i do vector unitário normal à interface sólido/líquido dirigida da parte sólida para a parte líquida; u_i é a componente i do vector velocidade na interface sólido/líquido

e ψ representa a relação entre a área ocupado pelo fluido A_f , e a área total A_0 , num dado nível z e vem expressa por:

$$\psi = \psi(z) = \frac{A_f(z)}{A_0} \quad (2.11)$$

Ao aplicar a decomposição média espacial definida na equação (2.6), o operador média espacial e tendo em conta os teoremas acima descritos obtêm-se as DANS.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle \bar{u}_j \rangle}{\partial t} + \langle \bar{u}_i \rangle \frac{\partial \langle \bar{u}_j \rangle}{\partial x_i} = g_j - \frac{1}{\psi \rho^{(w)}} \frac{\partial \psi \langle \bar{p} \rangle}{\partial x_j} - \frac{1}{\psi} \frac{\partial \psi \langle \overline{u'_j u'_i} \rangle}{\partial x_i} - \frac{1}{\psi} \frac{\partial \psi \langle \tilde{u}_j \tilde{u}_i \rangle}{\partial x_i} \\ + \frac{1}{\psi} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\psi \left\langle \nu^{(w)} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right\rangle \right) + \frac{1}{\rho^{(w)} \nabla_f} \int_{S_{int}} \bar{p} n_j dS - \frac{1}{\nabla_f} \int_{S_{int}} \nu^{(w)} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} n_i dS \end{aligned} \quad (2.12)$$

À semelhança da obtenção do termo das tensões de Reynolds da equação RANS (2.5), quando se obtêm as equações DANS (??) surge o termo das tensões dispersivas $(-\rho \langle \tilde{u}_i \tilde{u}_j \rangle)$, devido à não linearidade do termo convectivo. Este termo deve-se às perturbações espaciais da velocidade, em relação à média temporal (Nikora *et al.* 2001 e Campbell 2005, pp.63-64). Os últimos dois termos da equação (??), resistência de forma e resistência viscosa, surgem devido à não comutatividade dos operadores diferencial e média quando o volume de controlo contém as fases sólidas e líquidas.

Na realidade existem duas possibilidades de obter as equações de dupla média. Aplicar a média temporal primeiro, obtendo as RANS e aplicar a média espacial (média tempo-espaco) ou aplicar a média espacial e posteriormente a média temporal (média espaco-tempo). Ambos os casos conduzem a resultados idênticos (Pokrajac *et al.* 2008). Nikora *et al.* 2007a defende que a primeira opção pode ser vantajosa tendo em conta o maior número de estudos desenvolvidos a partir da média temporal, levando a uma maior transparência de resultados.

Ricardo 2008 estudou a interacção de vegetação emersa rígida em escoamentos turbulentos. Definiu que um escoamento na presença de hastes rígidas, cilíndricas e emersas apresenta três zonas distintas caracterizadas por diferentes volumes de controlo. Na Figura 2.6 mostra-se um esquema representativo de um escoamento com leito rugoso, onde estão localizadas essas três zonas. A linha azul representa a superfície livre.

De seguida serão descritas as zonas identificadas na Figura 2.6:

- Zona A, área entre o plano onde se encontram os pontos mais baixos do leito e o plano onde se encontram as cristas mais altas. A função de vazios varia entre zero e $n\pi r^2$, onde r é o raio das hastes e n é o número de hastes por unidade de área.
- Zona B, coluna de água definida pela área entre as zonas A e C. A função de vazios é constante e igual a $n\pi r^2$.

- Zona C, área compreendida entre a cota mais baixa e mais alta das oscilações da superfície livre. A função de vazios varia entre $n\pi r^2$ e zero.

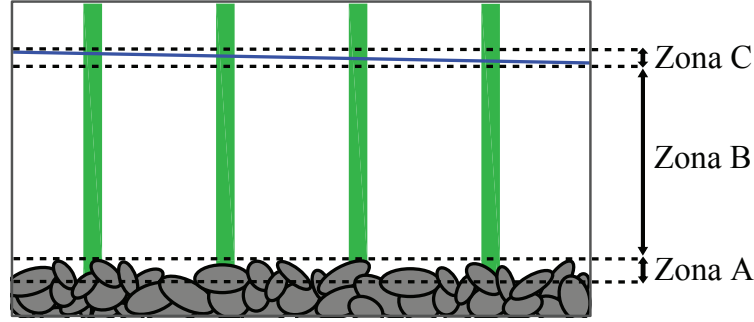


Figura 2.6: Representação esquemática das regiões com diferentes funções de vazios.

Ricardo 2008 simplificou a escrita das DANS, para cada uma destas três zonas, definindo uma equação única válida em toda a coluna de água. Sendo a função de vazios definida como:

$$\psi(z) = \begin{cases} \psi^{(A)} = \frac{A_f^{(A)}}{A_0} = \frac{A_0 - S^{(s)} - S^{(b)}}{A_0}, & \text{zona A} \\ \psi^{(B)} = \frac{A_f^{(B)}}{A_0} = \frac{A_0 - S^{(s)}}{A_0}, & \text{zona B} \\ \psi^{(C)} = \frac{A_f^{(C)}}{A_0} = \frac{A_0 - S^{(s)} - S^{(ar)}}{A_0}, & \text{zona C} \end{cases} \quad (2.13)$$

em que $A_f^{(i)}$ corresponde à área de fluido na área de controle, A_0 , na zona i , $S^{(s)}$, $S^{(b)}$ e $S^{(ar)}$ correspondem, respectivamente, à parcela ocupada pelas hastes, pelo material do fundo e por ar na área de controle.

Considerando a função

$$\delta^{(i)} = \begin{cases} 1, & \text{na zona } i \\ 0, & \text{fora da zona } i \end{cases} \quad (2.14)$$

onde $i = A, B$ ou C , as DANS para um escoamento condicionado pela presença de elemen-

tos rígidos emersos escrevem-se:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial t} + \langle \bar{u}_j \rangle \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} &= g_i - \frac{1}{\psi \rho} \frac{\partial \psi \langle \bar{p} \rangle}{\partial x_i} + \frac{1}{\psi} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\psi \left\langle \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right\rangle \right) \\
&- \frac{1}{\psi} \frac{\partial \psi \langle \overline{u'_i u'_j} \rangle}{\partial x_j} - \frac{1}{\psi} \frac{\partial \psi \langle \tilde{u}_i \tilde{u}_j \rangle}{\partial x_j} + \frac{\delta^{(A)}}{\rho V_f^{(A)}} \int_{S_{int}^{(s)}} \bar{p} n_i dS + \frac{\delta^{(B)}}{\rho V_f^{(B)}} \int_{S_{int}^{(s)}} \bar{p} n_i dS \\
&+ \frac{\delta^{(C)}}{\rho V_f^{(C)}} \int_{S_{int}^{(s)}} \bar{p} n_i dS - \frac{\delta^{(A)}}{V_f^{(A)}} \int_{S_{int}^{(s)}} \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} n_j dS - \frac{\delta^{(B)}}{V_f^{(B)}} \int_{S_{int}^{(s)}} \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} n_j dS \\
&- \frac{\delta^{(C)}}{V_f^{(C)}} \int_{S_{int}^{(s)}} \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} n_j dS + \frac{\delta^{(A)}}{\rho V_f^{(A)}} \int_{S_{int}^{(b)}} \bar{p} n_i dS - \frac{\delta^{(A)}}{V_f^{(A)}} \int_{S_{int}^{(b)}} \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} n_j dS \quad (2.15)
\end{aligned}$$

Na tabela 2.1 identificam-se os termos utilizados na equação (2.15).

Tabela 2.1: Termos e significados físicos da equação DANS.

Termo	Significado físico
$\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial t}$	Aceleração local do fluido
$\langle \bar{u}_j \rangle \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j}$	Aceleração convectiva do fluido
g_i	Aceleração da gravidade
$\frac{1}{\psi \rho} \frac{\partial \psi \langle \bar{p} \rangle}{\partial x_i}$	Gradiente da pressão (força por unidade de massa)
$-\frac{1}{\psi} \frac{\partial \psi \langle \overline{u'_i u'_j} \rangle}{\partial x_j}$	Gradiente das tensões de Reynolds
$-\frac{1}{\psi} \frac{\partial \psi \langle \tilde{u}_i \tilde{u}_j \rangle}{\partial x_j}$	Gradiente das tensões dispersivas
$\frac{1}{\psi} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\psi \left\langle \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right\rangle \right)$	Gradiente das tensões viscosas
$\frac{1}{\rho V_f} \int_{S_{int}} \bar{p} n_i dS$	Resistência de forma (força por unidade de massa de líquido)
$\frac{1}{V_f} \int_{S_{int}} \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} n_j dS$	Resistência viscosa (força por unidade de massa de líquido)

Capítulo 3

Instalações laboratoriais e instrumentação

3.1 Introdução

Pretende-se caracterizar o escoamento turbulento em leitos com vegetação emersa rígida. Para caracterizar o escoamento, é necessário calcular quantidades instantâneas nomeadamente mapas de velocidade instantânea. Assim, o trabalho laboratorial foi desenvolvido para determinar estes mapas de velocidade instantânea em duas dimensões, recorrendo a uma técnica pouco intrusiva, o *Particle Image Velocimetry* (PIV).

Os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura do Instituto Superior Técnico, no canal de recirculação e inclinação variável (CRIV) (<https://fenix.ist.utl.pt/investigacao/cehidro/lateral/laboratorio-de-hidraulica/projecto-de-reequipamento>).



Figura 3.1: Vista geral do CRIV.

As instalações laboratoriais e instrumentação serão descritas nas seguintes secções, com especial atenção para a descrição do CRIV e dos seus acessórios e do sistema PIV.

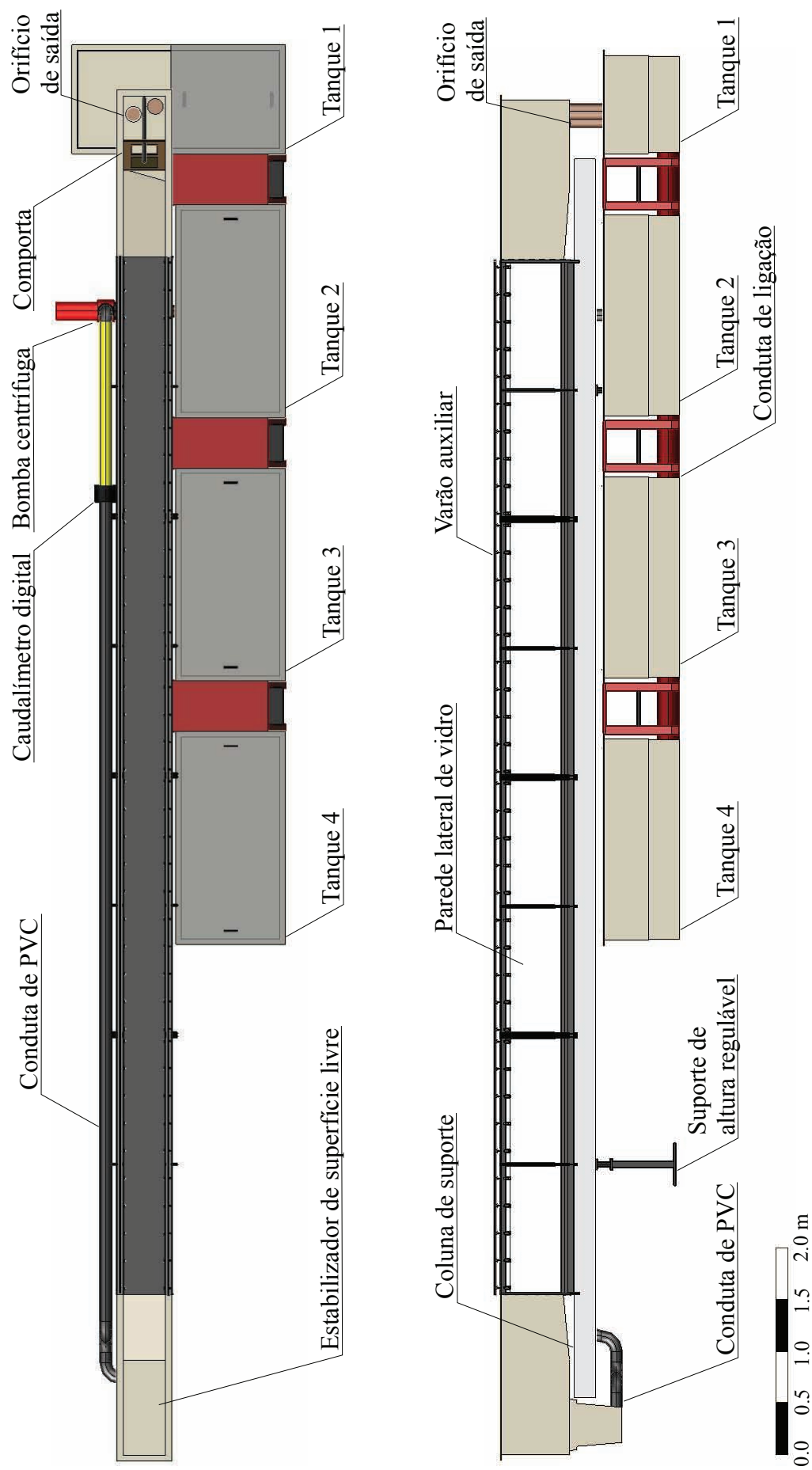


Figura 3.2: Planta e alçado lateral direito do CRIV, em cima e em baixo respectivamente (adaptado de Ricardo 2008 p.42).

3.2 Instalações laboratoriais

O CRIV é composto por um canal prismático com as respectivas estruturas de entrada e saída, suportado por uma estrutura metálica e por um circuito de recirculação. Na Figura 3.2 apresenta-se a planta e o alçado lateral direito do CRIV, detalhando os principais elementos.

O canal prismático de secção transversal rectangular tem 12.5 m de comprimento, 409 mm de largura e 500 mm de altura. Lateralmente, apresenta 8 painéis de vidro transparente (Figura 3.3 a)) apoiados numa estrutura metálica, que possui superiormente um varão auxiliar com um comprimento efectivo de 10 m que corresponde ao comprimento efectivo do canal. As paredes laterais de vidro permitem a visualização do escoamento e medições com técnicas baseadas na visualização do escoamento. No varão auxiliar é instalado um carrinho de suporte que servirá de apoio aos ensaios, medições e calibrações necessárias ao longo de todo o trabalho experimental (Figura 3.3 b)).

O sistema de inclinação variável é composto por um suporte motorizado em contacto com o chão e com a coluna metálica que suporta o canal. Este sistema permite o ajuste do declive entre $-1/200$ e $+1/40$ (Figura 3.3 c)).

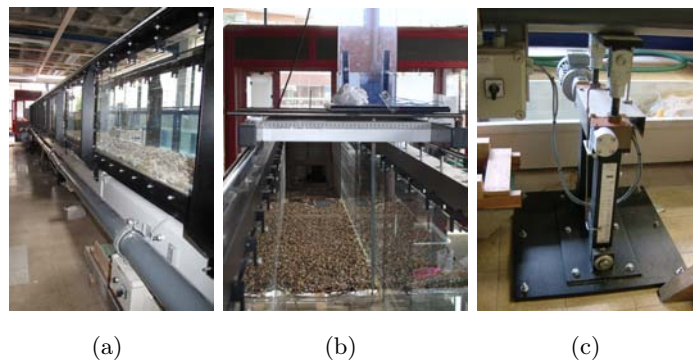


Figura 3.3: Elementos do CRIV: a) paredes de vidro lateral; b) suporte móvel instalado no varão auxiliar e c) suporte de altura regulável.

O escoamento é introduzido no canal por uma conduta de PVC (Figura 3.4 a)), assumindo inicialmente uma direcção vertical. Para reduzir as oscilações da superfície livre provocadas por este efeito, encontra-se uma placa de madeira na estrutura de entrada do canal, funcionando assim como um estabilizador da superfície livre (Figura 3.4 b)).

A jusante, na estrutura de saída, a água é escoada verticalmente, por gravidade, através de dois orifícios para um tanque de armazenamento (Figura 3.4 c)). Existe também uma comporta basculante que pode ser usada para regular a altura de um escoamento lento no canal (Figura 3.4 d)).

As estruturas de entrada e saída do canal são ligadas pelo sistema de recirculação do CRIV, composto por um circuito em pressão, no qual se controla o escoamento, e por quatro tanques de inércia e armazenamento com uma capacidade de cerca de 1.1 m^3 cada um (Figura 3.5 a)).

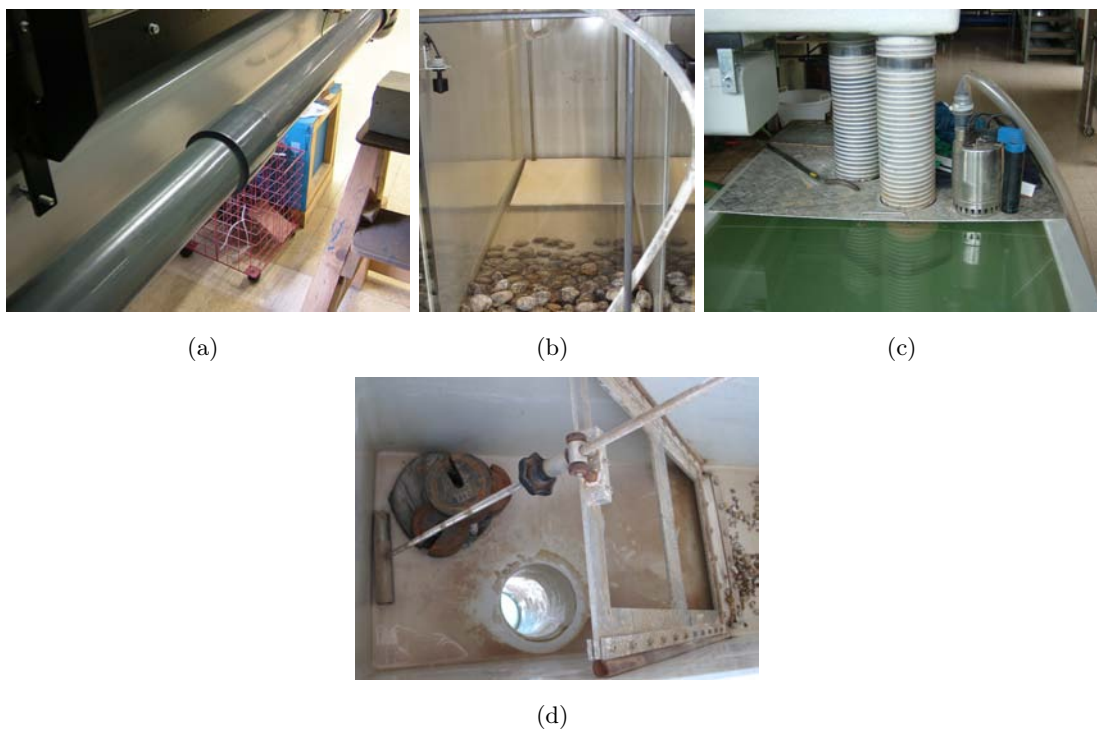


Figura 3.4: Estrutura de entrada e saída do CRIV: a) conduta de PVC; b) estabilizador de superfície livre; c) orifícios de saída e d) comporta de jusante.

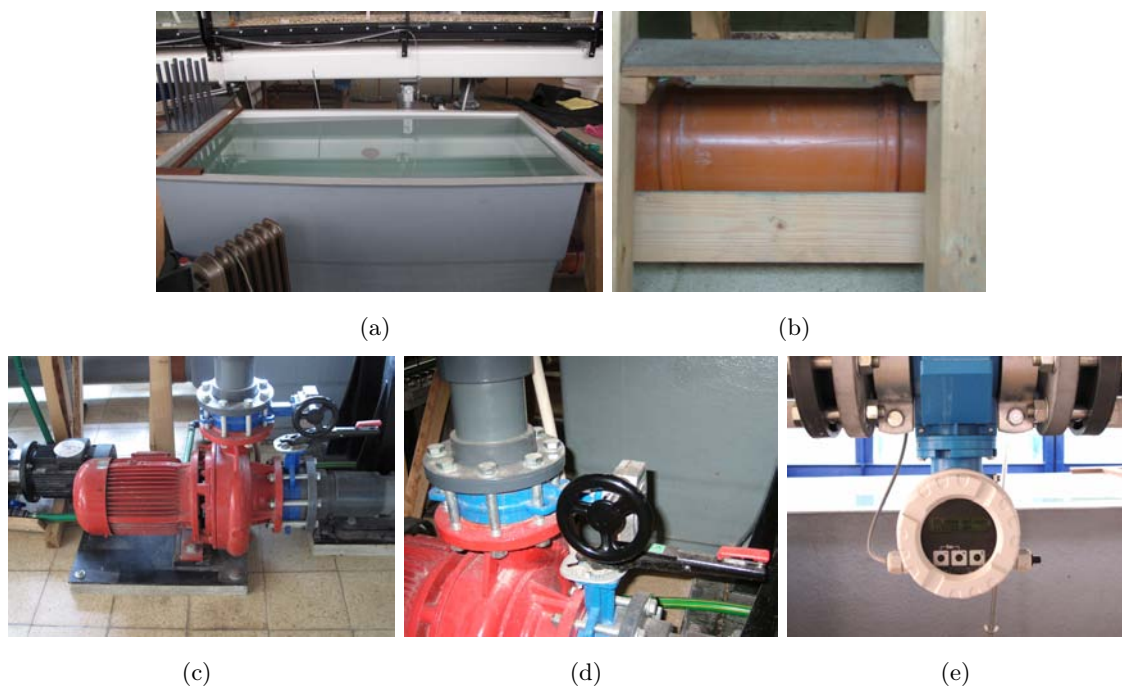


Figura 3.5: Circuito de recirculação do CRIV: a) conduta de PVC; b) conduta de ligação entre tanques; c) bomba centrífuga d) válvula de controlo e regulação do caudal e e) caudalímetro digital.

Os tanques comunicam entre si através de tubagens com 200 mm de diâmetro (Figura 3.5 b)). Por intermédio de uma bomba centrífuga (Figura 3.5 c)), a água armazenada é elevada por uma conduta de PVC com 100 mm de diâmetro para a estrutura de entrada. A bomba centrífuga consegue elevar um caudal máximo de 25 l/s. A admissão à bomba é feita num tanque diferente do que recebe o escoamento, com o objectivo de minimizar a entrada de ar na bomba. A montante da bomba existe uma válvula de seccionamento e a jusante uma válvula de retenção. A jusante da bomba existe também uma válvula que permite o controlo e regulação do caudal (Figura 3.5 d)). Através de um caudalímetro digital, é possível medir o caudal instantâneo (Figura 3.5 e)).

3.3 Instrumentação

A utilização de equipamento nas instalações laboratoriais corresponde às seguintes tarefas: medição de campos de velocidades instantâneas, determinação da superfície livre e determinação da topografia do fundo para leito de areia e leito rugoso.

No presente sub-capítulo pretende-se descrever o equipamento utilizado.

A topografia do fundo do canal para cada um dos leitos foi medida de forma diferente. Para o leito de areia, foi utilizado um hidrómetro de ponta direita com uma precisão de cerca de 1.0 mm (Figura 3.6). Na Figura 3.3 b) pode-se ver o hidrómetro de ponta fixo no suporte móvel.



Figura 3.6: Hidrómetro de ponta.

Para o leito rugoso foi utilizado um sistema de medição com um laser de alta precisão fornecido pela Keyence[®], modelo LK-501. Este sistema é constituído pelas seguintes componentes:

- i) cabeça do laser (Figura 3.7 a));
- ii) caixa de controle (Figura 3.7 b));
- iii) sistema de aquisição de dados (Figura 3.7 c)).

O laser mede distâncias com uma precisão de cerca de 1 μm e um diâmetro mínimo de incidência de 30 μm . A cabeça do laser está ligada à caixa de controle que por sua vez está ligada a um sistema de aquisição de dados. Este é um sistema multicanal digital universal, denominado Spider8[®]. Permite, em conjunto com o seu software, controlar e visualizar os

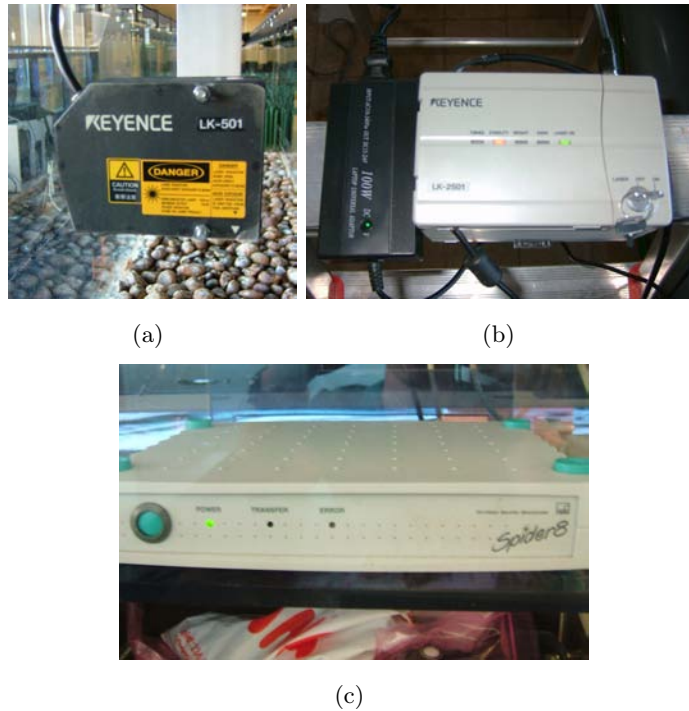


Figura 3.7: Componentes sistema de medição de laser: a) cabeça do laser; b) caixa de controle e fonte de alimentação e c) caixa de sistema de aquisição de dados Spider8®.

dados medidos consoante a frequência de aquisição e o número de amostra. Este sistema também foi utilizado para a obtenção do perfil de superfície livre.

Para a medição de campos de velocidades instantâneas, recorreu-se a um sistema PIV (*Particle Image Velocimetry*). O PIV é um método pouco intrusivo, utilizado em medições de escoamentos com grande heterogeneidade espacial (Ferreira 2011). O equipamento é constituído pelos seguintes componentes:

- i) cabeça do laser de dupla cavidade (Figura 3.8 a));
- ii) gerador do feixe de laser (Figura 3.8 b));
- iii) câmara CCD (Figura 3.8 c));
- iv) sistema de controlo temporal (Figura 3.8 d));
- v) software de aquisição e processamento de dados (Figura 3.8 e)).

O laser fornecido pela Dantec® é do tipo Nd:YAG (cristal de YAG - *Yttrium Aluminium Garnet*- infiltrado com iões de Neodímio) e emite luz da gama infra-vermelha (IV). Os comprimentos de onda desta gama, não são visíveis ao olho humano o que colocaria em risco a segurança do utilizador. Esta luz de gama infra-vermelha é transformada em luz visível de cor verde com comprimento de onda de 532 nm (Figura 3.9), através de um sistema incorporado na cabeça do laser (*second harmonic generator* na literatura inglesa) (Raffel *et al.* 1998, p.39). O plano de luz que ilumina cada secção requer alinhamento dos

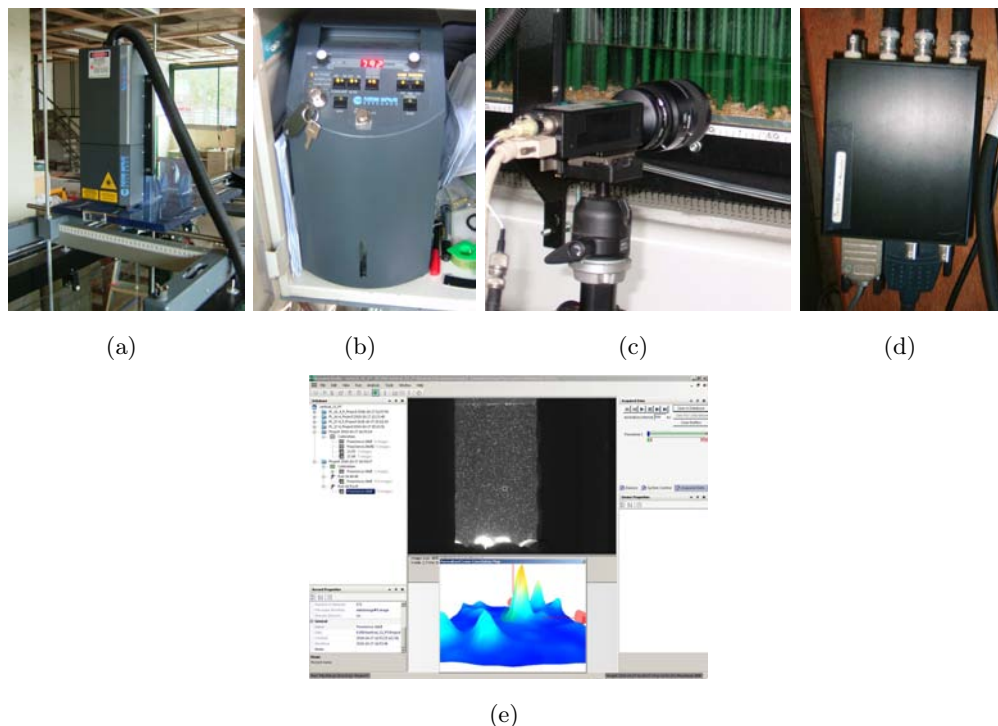


Figura 3.8: Componentes do sistema PIV: a) cabeça do laser na vertical apoiado no suporte móvel; b) gerador do laser; c) câmara CCD; d) caixa de sincronização e e) software DynamicStudio[®].

feixes incidentes. Para isso, a cabeça do laser dispõe de um sistema óptico que permite ajustar manualmente o alinhamento do feixe de luz. As principais características da luz produzida por este laser são o facto de ser monocromática, coerente e de possuir grande direcionalidade. O sistema óptico inclui lentes esféricas e cilíndricas. A lente cilíndrica permite que o feixe fique divergente, gerando um plano de luz. A lente esférica controla a espessura desse plano (Tropea *et al.* 2007, pp.313-314).

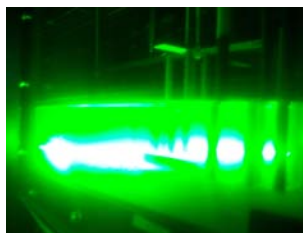


Figura 3.9: Disparo de laser do sistema PIV.

O intervalo de tempo entre dois impulsos consecutivos pode ser controlado pelo utilizador. Este sistema é capaz de gerar uma energia de 30 mJ, até 15 vezes por segundo. A radiação emitida por este laser pertence à classe mais perigosa, classe quatro. A exposição ao laser é perigosa para a visão em qualquer circunstância (directamente ou difundida) e apresenta risco para a pele, pelo que a sua utilização requer extrema precaução. É obrigatória a utilização de óculos protectores com filtros de luz verde (Figura 3.10 a)), e a entrada do laboratório deve ser devidamente sinalizada e restringida durante os ensaios (Figura 3.10 b)).



Figura 3.10: Segurança no laboratório: a) óculos de protecção e b) sinalização à entrada do laboratório.

O gerador é a unidade de fonte de alimentação, arrefecimento, controlo e produção do feixe de luz. Permite disparar o laser controlando se a emissão dos impulsos é única ou dupla, assim como a sua intensidade. Existem dois modos distintos de operação: modo interno controlado directamente pelo utilizador no gerador ou modo externo controlado pelo software de aquisição e processamento de dados, neste caso o DynamicStudio®.

É neste software de interface amigável, que é realizada a calibração do sistema PIV para cada ensaio a realizar. Aqui é definido o tempo entre dois impulsos consecutivos, a frequência dos impulsos e o número de imagens a gravar por ensaio. Em relação à análise e processamento de dados as variáveis de controlo são:

- o tipo de correlação;
- o tamanho da área de interrogação;
- o método de validação dos dados adquiridos.

O princípio de funcionamento da câmara CCD (*charge-coupled device*), baseia-se no efeito fotoelétrico. Possui um sensor electrónico que converte luz em cargas eléctricas, permitindo assim a detecção de luz. A carga de cada pixel é transferida pelo mesmo canal de saída, o que é fiável por não estar sujeito a ruído mas porém lento. A câmara, com resolução de 1600x1200 pixeis, regista a secção iluminada pelo feixe de luz do laser. As partículas são identificadas nas imagens captadas pela câmara como pontos brilhantes num fundo negro, ou seja, níveis de cinzento. É portanto fundamental garantir o máximo contraste possível entre ambos, não só garantindo iluminação suficiente por parte do feixe de laser, como reduzindo a luminosidade no laboratório. Por essa razão, durante os ensaios, o canal é coberto com panos pretos (Figura 3.11 a)).

A caixa de sincronização é responsável por controlar os tempos de acção de todos os componentes envolvidos na aquisição de imagens. É necessária a utilização de um sistema de sincronização entre a emissão dos impulsos do laser e a aquisição de imagens pela câmara (Sveen & Cowen 2004, p.8).

Foi feito um controlo da temperatura da água para estimar a viscosidade da água. Para tal, utilizou-se um termómetro digital localizado a jusante do canal, na estrutura de saída (Figura 3.11 b)).

O equipamento de medição é apoiado no suporte móvel apoiado sobre os varões do canal.

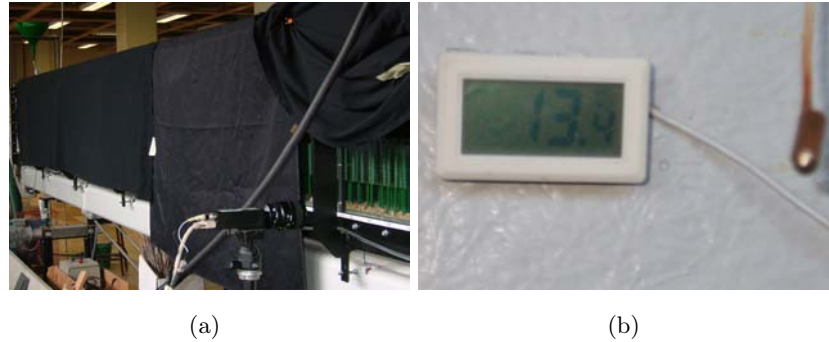


Figura 3.11: a) Panos pretos a cobrir o canal b) termómetro digital.

3.4 *Particle Image Velocimetry (PIV)*

3.4.1 Princípios e fundamentos

O PIV é uma técnica óptica que permite medir mapas de velocidade instantâneas em escoamentos de fluidos limitando a intrusão à adição de partículas sólidas ao escoamento. Como o nome sugere, esta técnica regista a posição de micro-partículas suspensas no escoamento (partículas traçadoras) em dois instantes de tempo consecutivos, de modo a obter indirectamente a velocidade do escoamento. As partículas traçadoras ao passarem na secção de medição, são iluminadas por um feixe de laser permitindo o registo fotográfico da sua posição (Figura 3.12). O plano iluminado é gerado por um feixe de laser *quasi*-bidimensional sendo fino na direcção ortogonal ao plano de movimento que contém as duas componentes de velocidade que interessam medir, enquanto que é largo nas outras duas dimensões (Sveen & Cowen 2004, p.8 e Tropea *et al.* 2007, p.313). A Figura 3.13 mostra esquematicamente o modo de obtenção de imagens através deste método.

Esta técnica permite a gravação de imagens em grandes áreas dos campos de escoamento, garantindo uma ampla resolução espacial, enquanto que a resolução temporal (imagens registadas por intervalo de tempo) é limitada pela velocidade de disparo dos pares de pulsos de laser (Raffel *et al.* 1998, pp.5-6). Os impulsos de laser e a câmara devem trabalhar simultaneamente e têm que estar sincronizados num intervalo de tempo adequado às condições do escoamento que está a ser analisado. A câmara deve conseguir a captação de duas imagens temporalmente muito próximas, de forma a que as mesmas partículas apareçam em ambas as imagens. Isto é possível com a utilização de uma câmara cujo obturador funcione a velocidades elevadas, gravando imagens continuamente e com um tempo de registo de cada imagem muito pequeno em comparação com o tempo entre



Figura 3.12: Exemplo de um registo fotográfico.

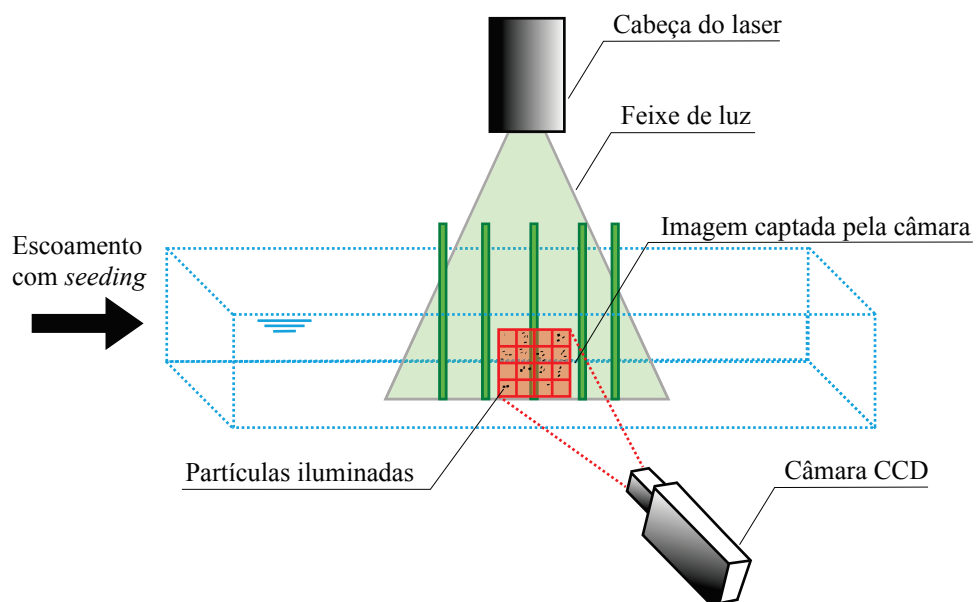


Figura 3.13: Representação esquemática da técnica de medição PIV.

dois impulsos consecutivos (Δt). Na Figura 3.14 mostra-se um diagrama temporal para medições PIV utilizando uma câmara CCD de alta velocidade, onde o primeiro feixe de luz (imagem 1) coincide com o fecho do obturador da câmara e o feixe de luz imediatamente a seguir (imagem 2) coincide com a abertura do obturador da câmara (Raffel *et al.* 1998, pp.104-108).

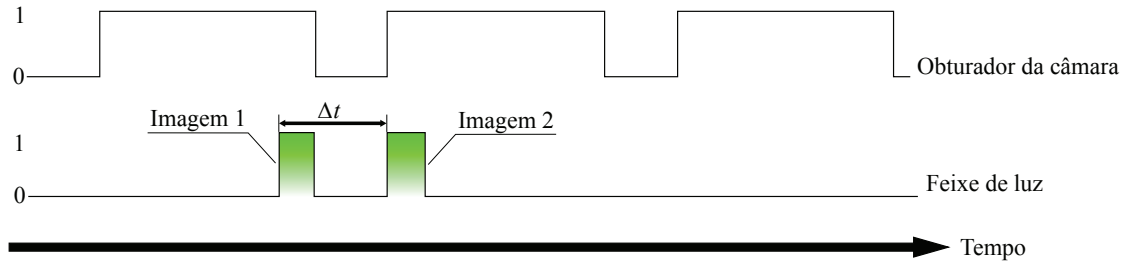


Figura 3.14: Diagrama temporal para medições PIV utilizando uma câmara CCD de alta velocidade. O obturador da câmara está aberto para a linha superior (1) e fechado para a inferior (0).

A captação da posição das partículas iluminadas por dois pulsos de laser consecutivos geram um par de imagens. A primeira imagem é captada a um tempo t e a segunda imagem a um tempo t' , onde $t' = t + \Delta t$ e Δt é o intervalo de tempo entre os dois pulsos de iluminação. O deslocamento das partículas (Δd_i) segundo a direcção i nesse par de imagens, é determinado pela análise das imagens aplicando uma função de correlação baseada no algoritmo da transformada de Fourier, pixel a pixel, em pequenas sub-áreas (Westerweel 1997 e Sveen & Cowen 2004, pp.7-10). Estas pequenas sub-áreas são designadas por áreas de interrogação. A técnica PIV baseia-se na presunção que as partículas que estão numa área de interrogação em t estarão também em t' . Cada área de interrogação é analisada separadamente para obter o mapa de velocidades instantâneas em toda a imagem. Portanto, a resolução espacial é tanto melhor quanto mais pequena for a dimensão das áreas de interrogação. O pico da função de correlação deve ser interpretado como sendo o vector médio de deslocamento nessa área de interrogação (Figura 3.15).

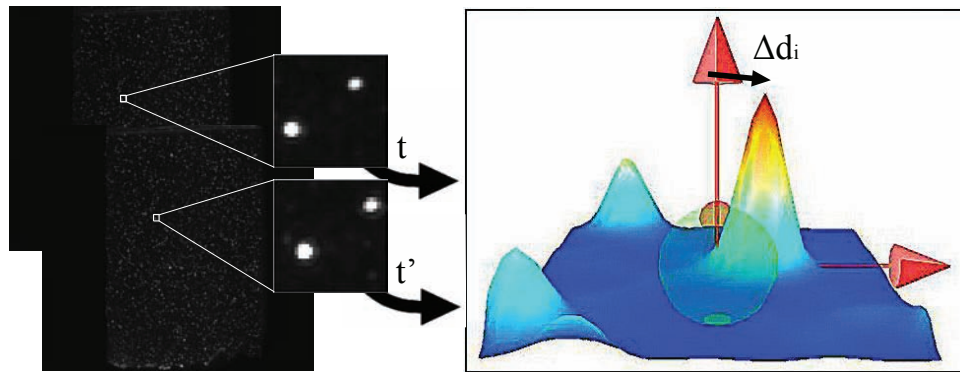


Figura 3.15: Exemplo do mapa de correlação de um par de áreas de interrogação através do software DynamicStudio® (*Cross-correlation map*).

Sabendo o deslocamento das partículas (Δd_i) e o intervalo de tempo entre dois pulsos de laser consecutivos (Δt), pode-se obter as componentes longitudinal u e vertical w das velocidades instantâneas no plano iluminado a partir de uma aproximação da definição de velocidade:

$$u(x, z) \simeq \frac{(x + \Delta d_x) - x}{\Delta t} \quad (3.1a)$$

$$w(x, z) \simeq \frac{(z + \Delta d_z) - z}{\Delta t} \quad (3.1b)$$

O método de análise por correlação mais comum para determinar o deslocamento médio das partículas numa área de interrogação é a correlação cruzada (Tropea *et al.* 2007, pp.321-322). É avaliado o grau de tonalidade cinza de cada pixel numa área de interrogação, para o par de imagens resultante de dois pulsos de laser consecutivos. Essencialmente a função de correlação cruzada mede estatisticamente a correspondência entre a variação desse par de imagens. Idealmente a tonalidade cinza das partículas deve ser máxima assumindo a cor branca, contrastando com o fundo preto. Quanto maior for o grau de contraste, melhor o valor de correlação obtida, com menor interferência de ruído ou aparecimento de picos secundários.

Este modelo é frequentemente utilizado por apresentar um nível de ruído significativamente inferior e por eliminar ambiguidade na direcção do escoamento (Westerweel 1997, Raffel *et al.* 1998, p.128 e Campbell 2005, pp.82-84). A obtenção de resultados melhores surge em detrimento da exigência de uma maior capacidade computacional e de câmaras com elevada taxa de transferência de dados. Segundo Wereley & Meinhart 2000 surgiram novos modelos através de algoritmos modificados de correlação cruzada, surgindo a correlação média e a correlação recursiva (*adaptative correlation* na literatura inglesa). Esta última consiste numa sucessão de passos onde os dados são analisados inicialmente com pouco detalhe, a uma escala maior com maiores áreas de interrogação sendo progressivamente analisados com mais rigor, diminuindo a dimensão das áreas de interrogação. A fiabilidade da correlação é garantida através da informação proveniente do passo anterior, sendo o pico de correlação usado para recentrar a próxima área de interrogação mais pequena. Este modelo ganhou popularidade como sendo mais eficiente, levando a melhores resultados e maximizando a resolução espacial das medições PIV (Wereley & Meinhart 2000). Também é aplicável em escoamentos com gradientes de velocidade não desprezáveis e embora constitua um processo moroso e complexo é fortemente recomendado (Simão *et al.* 2009).

A validade dos mapas de vectores instantâneos obtidos é feita individualmente para cada vector ao comparar as suas propriedades com os valores médios dos vectores que constituem a sua vizinhança. Aplicando o algoritmo de validação, pode ser testada a consistência espacial e temporal dos vectores e a qualidade do sinal. Um vector considerado não coerente é substituído por outro de acordo com procedimentos baseados na média global, na média móvel ou na mediana local (Sveen & Cowen 2004, pp.23-26). Segundo

Westerweel 1993 o método de validação mais eficaz é o que se baseia na mediana local.

Na Figura 3.16 a) é apresentado um exemplo da obtenção do mapa de vectores velocidade instantânea para o par de imagens da Figura 3.15 correlacionado adaptativamente e validado segundo a mediana local. Os vectores a cor azul representam aqueles que foram calculados correctamente, enquanto que a verde aqueles que foram substituídos pelo processo de validação. Para este caso foram substituídos cerca de 35 % de vectores de velocidade instantânea na área visível do escoamento. A partir da totalidade de mapas de vectores velocidade instantânea registadas por aquisição, obtem-se um mapa de vectores velocidade média temporal (Figura 3.16 b)).

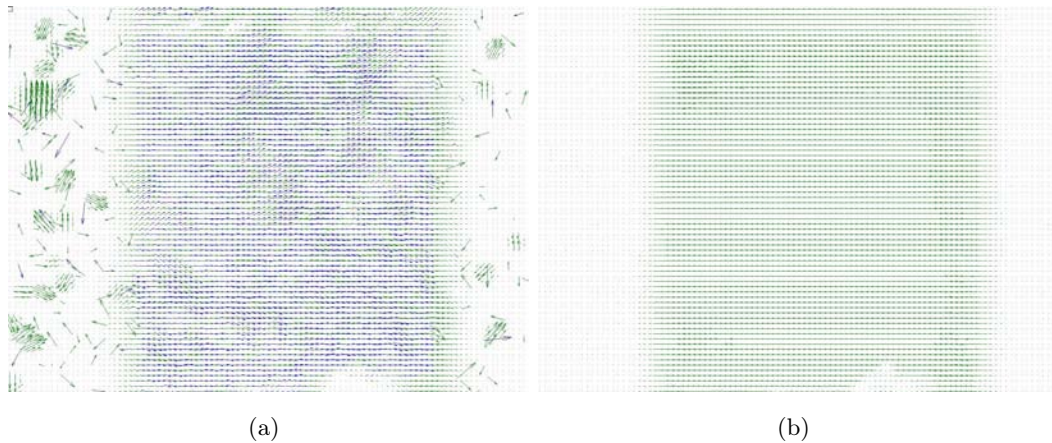


Figura 3.16: Mapas de vectores velocidade: instantânea para o par de imagens da Figura 3.15 e b) média temporal para 486 imagens registadas durante uma aquisição.

3.4.2 Variáveis para aquisição de dados

A escolha das variáveis de aquisição do sistema PIV está inerente à qualidade dos resultados obtidos. É importante minimizar a obtenção de dados erróneos de forma a garantir que estes estão tanto mais perto da realidade quanto possível. Os problemas mais comuns durante o processo de aquisição, que conduzem a estes erros podem ser defeitos na câmara, iluminação não homogênea, existência de áreas de interrogação com número insuficiente de partículas, ou fenómenos como *loss of pairs* e *bias-to-zero* (na literatura inglesa) (Raffel *et al.* 1998, pp.136-137, Sveen & Cowen 2004, pp.10-11, Campbell 2005, pp.84-85 e Tropea *et al.* 2007, p.1470).

O problema *loss of pairs* acontece quando as partículas registadas na primeira imagem deixam de existir na segunda imagem, impossibilitando a sua correspondência e diminuindo a correlação. Isto pode ocorrer em duas situações distintas:

- Dentro do plano: a partícula move-se para fora da sua área de interrogação antes de subsequente iluminação;
- Fora do plano: a partícula move-se perpendicularmente e para fora do plano de medição.

Antes de proceder à aplicação do algoritmo de correlação cruzada é possível aplicar uma sub-área junto às fronteiras de interrogação para prevenir e limitar a ocorrência de *loss of pairs* dentro do plano. Esta acção não tem influência para *loss of pairs* fora do plano (Ferreira 2011).

O enviesamento das velocidades instantâneas para valores nulos pode ter origem também num problema designado *bias-to-zero*, onde menos informação é correlacionada levando o algoritmo de interpolação sub-pixel a perder precisão e indicar deslocamentos nulos (Raffel *et al.* 1998, p.137).

A solução destes problemas depende fundamentalmente de três variáveis relacionadas entre si: o tempo entre dois impulsos de laser consecutivos (Δt), a quantidade de *seeding* e a dimensão da área de interrogação.

O intervalo de tempo entre dois pulsos de laser consecutivos Δt , deve ser suficientemente reduzido para que não ocorra *loss of pairs* e suficientemente elevado para que não ocorra *bias-to-zero*. Assim a escolha do Δt deve resultar do equilíbrio entre estes dois factores e a precisão das medições.

Em cada área de interrogação devem existir, regra geral, 12 partículas de *seeding* e o deslocamento das mesmas não deve ser maior a 25 % do lado da área de interrogação (Raffel *et al.* 1998, p.137). Portanto quanto menor for a área de interrogação, maior será a quantidade de *seeding* a introduzir no escoamento. Acresce que para áreas de interrogação de reduzida dimensão, existe maior risco de que as partículas de *seeding* terminem o seu deslocamento fora das fronteiras que limitam a área de interrogação, gerando problemas de *loss of pairs*. Por outro lado, quanto maior for a área de interrogação, menor será a precisão espacial do vector de velocidade instantâneo, obtido a partir da média local das partículas de *seeding* nessa área. Pode-se afirmar, que o tamanho da área de interrogação funciona como um filtro que elimina as pequenas escalas do movimento turbulento. É possível minimizar este problema utilizando o algoritmo de correlação recursivo explicado anteriormente.

3.4.3 Partículas traçadoras (*seeding*)

A escolha do *seeding* a utilizar é de extrema importância, pois está directamente relacionado com a qualidade dos resultados obtidos. As partículas traçadoras ou *seeding* desempenham um papel chave no processo de medição PIV. São responsáveis pela obtenção de deslocamentos instantâneos no escoamento através do registo da sua sucessiva posição, e por essa razão devem traduzir perfeitamente o comportamento do fluido. Nesse sentido, é desejável que tenham uma densidade praticamente neutra, cerca de 1 g/cm³ para ensaios com água e as suas propriedades devem ser adequadas de forma a minimizar problemas de escorregamento partícula / fluido. As partículas também devem respeitar um compromisso entre serem pequenas o suficiente para acompanharem bem o movimento do escoamento e grandes o suficiente para reflectirem a luz do laser e serem adequadamente captadas pela

câmara (Melling 1997).

O comportamento do espalhamento de luz das partículas é proporcional ao contraste e qualidade das imagens registadas pelo sistema PIV. De acordo com a teoria de Mie (Raffel *et al.* 1998, pp.18-20 e Tropea *et al.* 2007, pp.289-290), para partículas esféricas, o espalhamento de luz depende da orientação e do comprimento de onda (λ) da luz incidente na partícula, assim como do seu diâmetro (d_p). O espalhamento de luz é caracterizado pelo diâmetro normalizado, q , definido por:

$$q = \frac{\pi d_p}{\lambda} \quad (3.2)$$

A Figura 3.17 mostra a intensidade de luz espalhada para partículas de vidro esféricas na água com diâmetros de $1 \mu m$ e $10 \mu m$ e para um comprimento de onda λ de 532 nm. O diâmetro das partículas são maiores que o comprimento de onda incidente pelo laser. Os círculos vizinhos diferem numa escala de intensidade de 100. Existe uma clara tendência do aumento da intensidade do espalhamento de luz com o aumento do diâmetro das partículas.

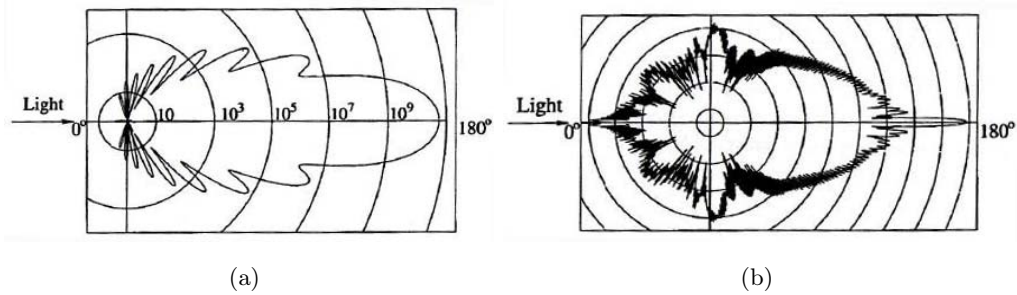


Figura 3.17: Diagramas de espalhamento de luz para partículas de vidro esféricas na água com diâmetros: a) $1 \mu m$ e b) $10 \mu m$ (Adaptado de Raffel *et al.* 1998 p.20).

Idealmente quer-se que as partículas traçadoras sejam não tóxicas, não corrosivas, não voláteis, não abrasivas e inertes quimicamente. Outros aspectos a considerar na escolha do *seeding* são o índice de refração, características da superfície, tamanho médio, forma e a uniformidade e distribuição das partículas na região de investigação (Raffel *et al.* 1998, pp.15-22).

Para o presente estudo, foram utilizadas partículas de *seeding* diferentes para os dois tipos de leito. Para o leito de areia foi utilizado um material comercializado pela *Dantec Dynamics*® designado por *Polyamide Seeding Particles* (PSP), e para o leito rugoso foi utilizado um material comercializado pela *MicroChem*® designado por *DECOSOFT 60*.

Em ambos os casos as micro-partículas são resultantes de um processo de polimerização. As partículas apresentam forma arredondada mas não completamente esférica e um índice de refração de 1.5. A massa volúmica do PSP é de 1.03 g/cm^3 , ou seja, muito semelhante à da água. Enquanto que a massa volúmica do *DECOSOFT 60* é de 1.31 g/cm^3 . Os diâmetros médios das partículas para os dois tipos de *seeding* variam entre 30 a 70 e entre 50 e 70 μm , respectivamente. Na Figura 3.18 a) mostra-se uma imagem do PSP ao microscópio digital.

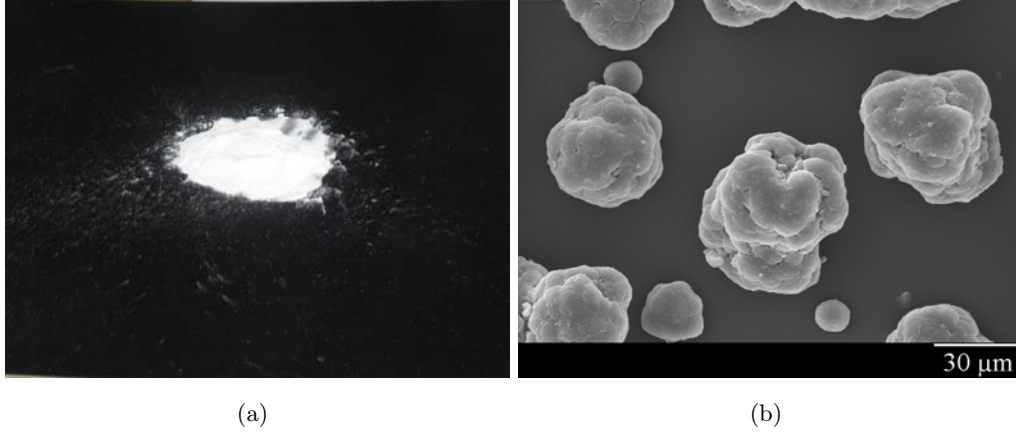


Figura 3.18: a) Partículas traçadoras artificiais adicionadas ao escoamento (PSP) b) Imagem ao microscópio digital das partículas traçadoras artificiais (PSP).

Segundo Melling 1997, é possível avaliar a aptidão que as partículas de *seeding* revelam para seguir um fluido em movimento através do rácio:

$$r_p \equiv \frac{\overline{V_p^2}}{\overline{V^2}} \quad (3.3)$$

onde V_p é o módulo da velocidade das partículas, V é o módulo da velocidade do escoamento. Assim quando $\overline{V_p^2} = \overline{V^2}$ as partículas seguem perfeitamente o fluido em movimento, correspondendo ao valor unitário do rácio. É considerado um valor aceitável de aptidão das partículas para valores de r_p superiores a 0.95.

Este valor pode ser obtido aplicando a solução de Hjemfelt & Mockros 1996 para o caso limite em que a densidade das partículas de *seeding* é muito maior que a densidade da água ($s^{(p)} \gg s^{(w)}$):

$$\frac{\overline{V_p^2}}{\overline{V^2}} \equiv r_p = \left(1 + \frac{2\pi f_c}{C}\right)^{-1} \quad (3.4)$$

onde

$$C = \frac{18\nu}{s^{(p)}d_p^2} \quad (3.5)$$

e V_p é o módulo da velocidade das partículas, V é o módulo da velocidade do escoamento, f_c é a frequência das estruturas turbulentas do escoamento do fluido, d_p é o diâmetro médio das partículas, $s^{(p)}$ é a densidade das partículas e ν é a viscosidade cinemática da água (Melling 1997).

A figura 3.19 mostra a variação do rácio r_p em função da frequência para os diâmetros médios dos dois tipos de *seeding* utilizados neste estudo. Da análise do gráfico conclui-se que para um valor de significância de 0.95 é adequado utilizar uma frequência até cerca de 60 Hz. A frequência temporal do sistema PIV é de 15 Hz, sendo a frequência de Nyquist das séries temporais de 7.5 Hz. Para ambos os tipos de *seeding* utilizados é garantida a qualidade do sinal temporal.

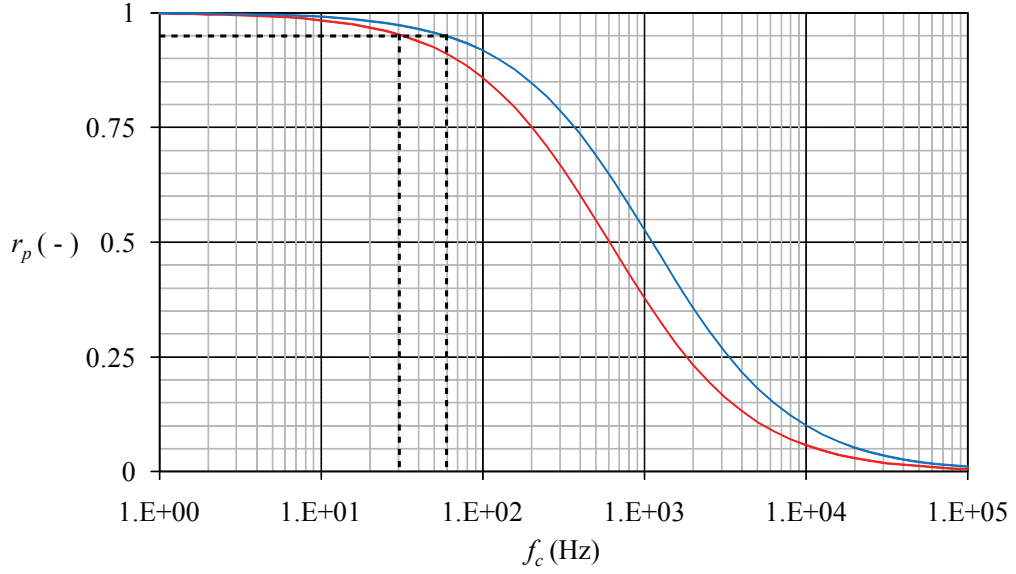


Figura 3.19: Rácio r_p em função da frequência para partículas PSP (a azul) e *DECOSOFT 60* (a vermelho), com diâmetros médios de: $50 \mu\text{m}$ e $60 \mu\text{m}$ respectivamente.

Espacialmente conclui-se que a frequência máxima para o mínimo de perda de informação será de 50 Hz, pelo que também é garantida a qualidade do sinal. Foi admitido uma velocidade (u) de 0.11 m/s e um comprimento de onda das estruturas turbulentas (λ_t) de 0.0022 m, correspondente ao dobro do lado da área de interrogação (cerca de 1.1 mm). Este é o espaço mínimo passível de se observar as estruturas turbulentas segundo o teorema de Nyquist (Tropea *et al.* 2007). O período (T) em segundos vem dado pela seguinte equação:

$$T = \frac{\lambda_t}{u} \quad (3.6)$$

O inverso do período traduz a frequência das estruturas turbulentas do escoamento.

Capítulo 4

Caracterização dos ensaios e procedimento experimental

4.1 Caracterização dos ensaios

4.1.1 Considerações gerais

Neste capítulo procede-se à descrição do trabalho laboratorial, desde a sua preparação, até ao procedimento experimental seguido, incluindo a caracterização das condições para a realização dos ensaios.

Pretende-se simular as condições de escoamento numa zona povoada por vegetação emersa rígida, representativa de planícies de inundação e zonas húmidas. O efeito da vegetação é provocado pela presença de hastes rígidas e cilíndricas de eixo vertical e diâmetro constante fixas ao longo do canal.

Foram realizados três conjuntos de ensaios distintos. Dois ensaios, para um leito de areia com grande densidade de hastes (A2) e pequena densidade de hastes (A1) e um ensaio para um leito rugoso, com grande densidade de hastes (R2).

O conjunto de testes propostos permite não só caracterizar a influência da densidade de hastes rígidas no escoamento com vegetação, comparando os ensaios A1 e A2, como também avaliar o impacto no mesmo escoamento para diferentes tipos de leito, através dos ensaios A2 e R2.

Na Tabela 4.1 apresentam-se os parâmetros de caracterização para cada ensaio experimental onde, n representa o número de hastes por unidade de área; d é o diâmetro das hastes; $[\langle \bar{u} \rangle]$ corresponde à velocidade longitudinal média na coluna de água da velocidade média temporal e espacial; $Re_p = [\langle \bar{u} \rangle]d/\nu$ é o número de Reynolds associado às hastes, onde ν é a viscosidade cinemática da água; $\phi = (\pi/4)d^2n$ é a fracção sólida da área de controlo; $a = nd$ é a área de vegetação projectada no plano normal ao escoamento por unidade de volume e $s = \sqrt{d/a}$ representa o espaçamento médio entre hastes.

Tabela 4.1: Parâmetros de caracterização dos ensaios experimentais.

	A1	A2	R2
n (hastes/m ²)	231	399	399
d (m)	0.011	0.011	0.011
$[\langle \bar{u} \rangle]$ (m/s)	0.1148	0.1023	0.1073
Re_p (-)	1367	1184	1267
ϕ (-)	0.022	0.038	0.038
a (m ⁻¹)	2.54	4.39	4.39
s (m)	0.066	0.050	0.050

Os parâmetros anteriormente descritos são tipicamente utilizados em estudos experimentais para caracterizar escoamentos na presença de vegetação (Nepf 1999, White & Nepf 2003, Tanino & Nepf 2008, White & Nepf 2008 e Ricardo 2008).

O valor do caudal foi escolhido de modo a que o escoamento seja turbulento mas com a superfície livre pouco perturbada que é uma condição necessária para a utilização do sistema PIV em escoamentos turbulentos (Ferreira *et al.* 2010). Segundo Nepf 1999, os valores de densidade de hastes apresentados são típicos em trabalhos de investigação com vegetação emersa e correspondem a valores densidade intermédios / baixos. O diâmetro característico da vegetação rígida presente em zonas húmidas e leitos de cheia pode variar entre 0.2 e 1.2 cm e atingir velocidades até 10 cm/s (Tanino & Nepf 2008). Adoptou-se um caudal (Q) de 2.33 l/s para os três ensaios.

4.1.2 Preparação do canal

Para o leito de areia foi utilizado um material granular formado por areia de quartzo com um diâmetro mediano, D_{50} , igual a 0.837 mm e densidade igual a 2.65. Na Figura 4.1 mostra-se a sua curva granulométrica e o seu aspecto no leito.

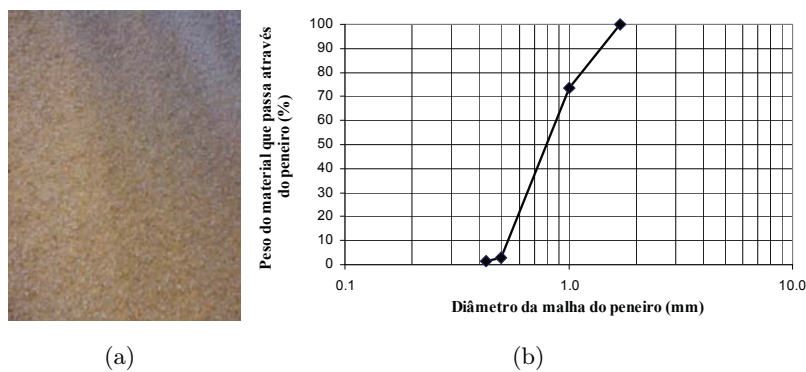


Figura 4.1: a) Aspecto do material utilizado para a construção do leito de areia e b) respectiva curva granulométrica (adaptado de Nogueira 2007, p.24).

Pretendeu-se criar ao longo de 3.8 m do canal um leito constituído por este material, de plano horizontal e liso. Para tal, cobriu-se uma camada de seixos já existente no fundo do canal por uma camada de 7 cm de areia. Com a ajuda do suporte móvel que se desloca ao longo do topo do canal e uma placa de PVC cortada em bisel, garantiu-se um leito liso e horizontal em toda a largura do canal. O leito começa a 5.1 m do início do canal.

Numa extensão de cerca de 3.1 m e em toda a sua largura do leito, foram cravadas hastes metálicas na vertical que simulam os caules rígidos de uma zona povoada por vegetação. Estas hastes são rígidas, cilíndricas e ocas, têm um diâmetro de 1.1 cm e cerca de 20 cm de comprimento (Figura 4.4 a).

Primeiramente para o ensaio A2, foram cravadas manualmente cerca de 500 hastes tentando respeitar uma densidade uniforme por toda a área. Adoptou-se uma distribuição de cerca de 40 hastes por cada 25 cm de extensão de leito, para evitar a existência de zonas com densidade maior ou menor de hastes. Para o ensaio A1, a densidade de hastes foi reduzida, pela remoção de cerca de um terço das hastes cravadas com o cuidado de manter uma densidade constante ao longo de toda a zona povoada (detalhes em Ricardo 2008). Na Figura 4.2 é possível observar um esquema da constituição do leito de areia e o seu aspecto.

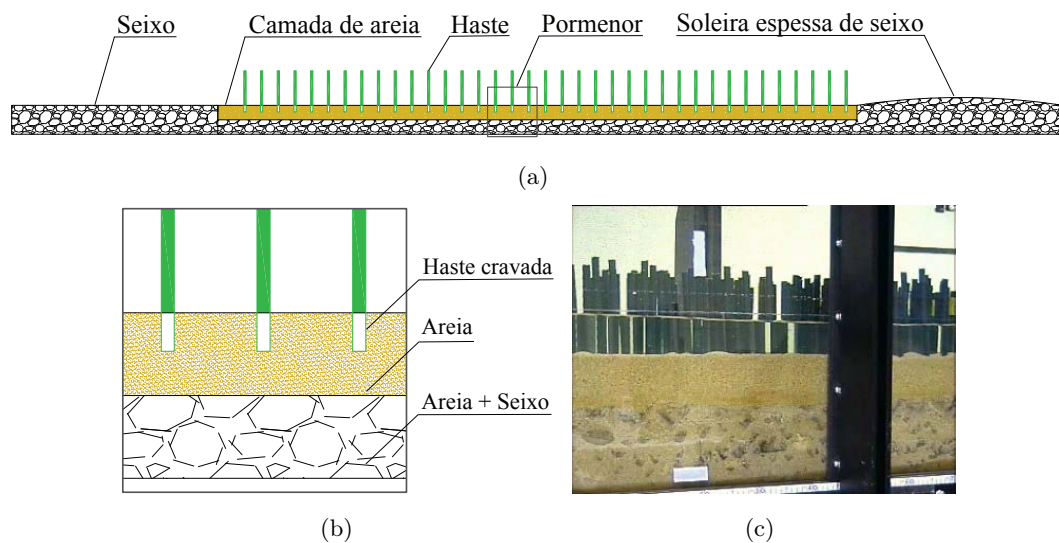


Figura 4.2: Leito de areia: a) esquema do leito de areia utilizado nos ensaios laboratoriais; b) pormenor do leito de areia e c) pormenor real do leito em zona povoada pelas hastes.

Para o leito rugoso foi utilizado um material granular formado por seixo rolado (Figura 4.3).

No ensaio R2, optou-se por fixar as hastes de forma diferente. Uma vez limpo o fundo do canal, montaram-se sete placas rectangulares de PVC com cerca de 0.50 m de comprimento, perfazendo um total de 3.5 m. As placas cobrem o fundo do canal em toda a sua largura e têm uma espessura de 1 cm.

A esta base, foram colados pequenos cilindros de PVC com cerca de 4.5 cm de altura e 8 mm de diâmetro. Estes elementos de suporte têm a função de fixar as hastes cilíndricas e



Figura 4.3: Material utilizado para a construção do leito rugoso.

ocas por encaixe. Acrescentou-se uma pequena quantidade de grãos de areia para diminuir a folga da superfície dos dois elementos, evitar que as hastes sofram pequenos deslocamentos e garantir que estas permaneçam imóveis. Na Figura 4.4 apresentam-se imagens dos elementos utilizados neste processo.

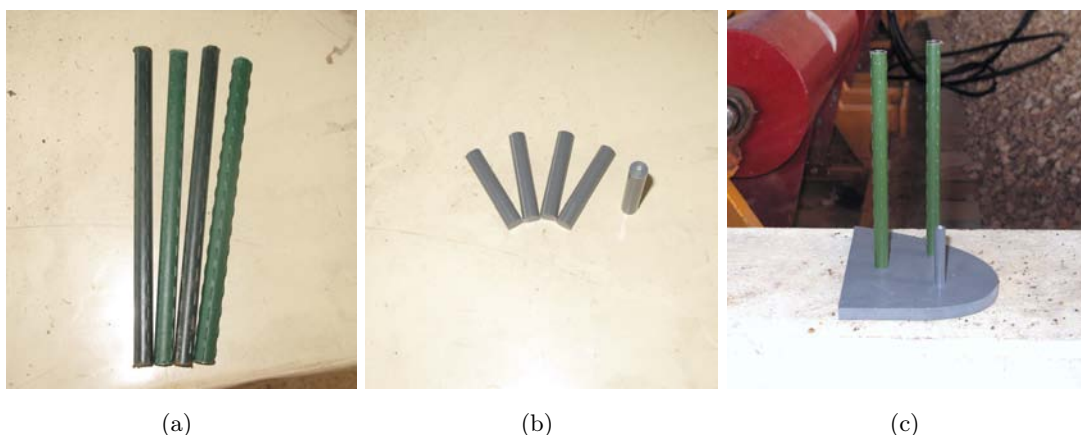


Figura 4.4: Elementos para fixação das hastes: a) hastes; b) suportes de PVC e c) sistema de fixação das hastes para o leito rugoso.

Sobre as placas de PVC foram colocadas 561 hastes com uma distribuição equilibrada ao longo do seu comprimento e largura. A superfície horizontal foi coberta por uma camada de cascalho fino com cerca de 1.5 cm de espessura. O material foi espalhado e calcado manualmente de forma a obter um leito tão paralelo ao fundo do canal quanto possível e sem qualquer tendência de inclinação. Adicionaram-se também pequenas quantidades de areia atenuando a rugosidade do leito e preenchendo os vazios existentes entre o seixo rolado. Na Figura 4.5 é possível observar um esquema da constituição do leito rugoso, como também o seu aspecto.

A velocidade do escoamento é nula junto às suas fronteiras, nomeadamente no fundo, o que se traduz num atraso da velocidade na camada adjacente a estas fronteiras (camada limite). A camada limite do fundo aumenta para jusante. Com o objectivo de acelerar o desenvolvimento da camada limite, foram colocados seixos a montante de ambos os leitos

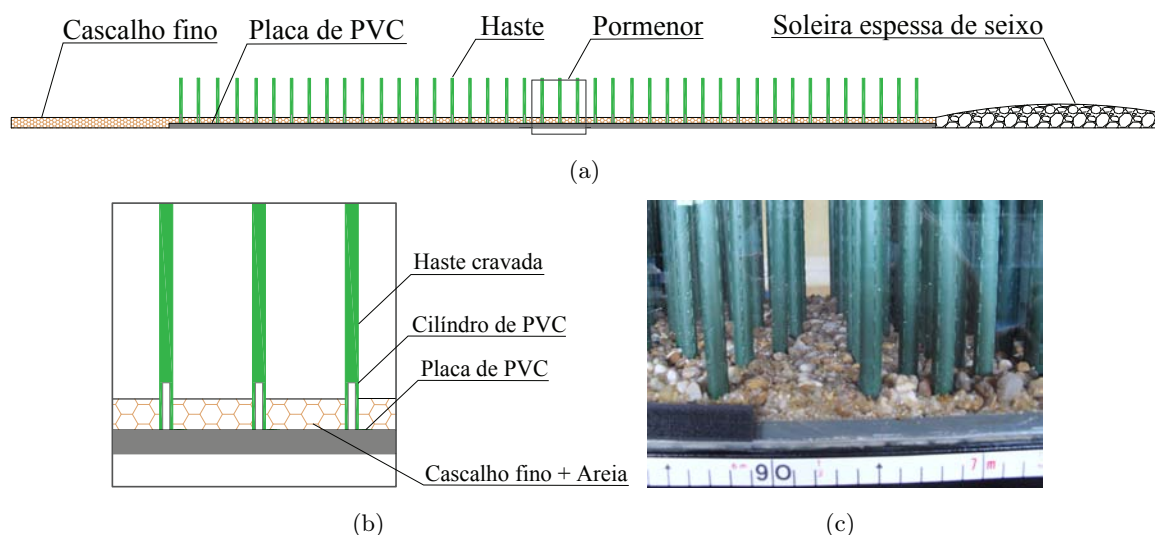


Figura 4.5: Leito rugoso: a) esquema do leito rugoso utilizado nos ensaios laboratoriais; b) pormenor do leito rugoso e c) pormenor real do leito em zona povoada pelas hastes.

(Figura 4.6 a)). A jusante, também foi colocada uma soleira espessa e permeável para fixar a altura do escoamento naquela secção (Figura 4.6 b)).

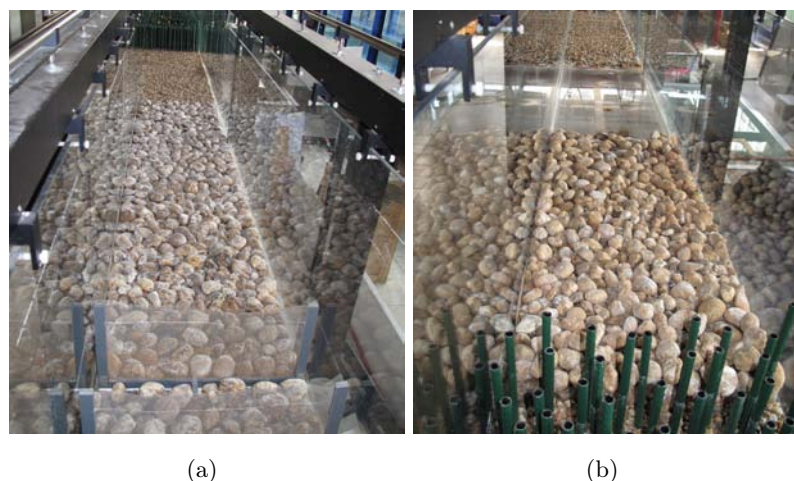


Figura 4.6: a) Soleira a montante do leito e b) soleira a jusante do leito.

4.1.3 Zonas de medição

Para a aplicação da técnica de medição PIV, é obrigatória a existência de um campo de visão livre e adequado para que a câmara consiga captar com sucesso todas as secções de medição. Houve um cuidado acrescido para que a densidade de hastes nestas zonas não fosse alterado e mesmo assim garantidas as condições necessárias à realização de medições. Na Figura 4.7 pode-se observar a área de visão captada pela câmara para cada ensaio. A zona de medições do ensaio R2 foi dividida numa zona a montante (M) e outra a jusante (J) da linha média de hastes. Foram realizadas medições nestas duas zonas em separado, no entanto o tratamento de dados foi feito em conjunto.

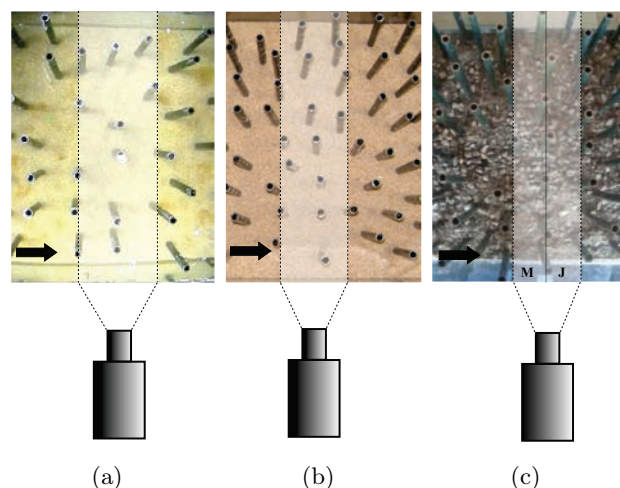


Figura 4.7: Esquema da área de visão captada pela câmara para cada ensaio: a) ensaio A1; b) ensaio A2 e c) ensaio R2. A seta representa o sentido do escoamento.

Pretendeu-se analisar o comportamento do escoamento na zona junto ao eixo do canal, efectuando medições do campo de velocidades em cinco posições laterais espaçadas por cerca de 2.5 cm. Este espaçamento é condicionado pela necessidade de se colocar a régua de calibração antes da realização dos ensaios, e pode sofrer alguns ajustes caso as hastes nessa zona não permitam a sua colocação. Na Tabela 4.2 apresenta-se as posições de medição adoptadas para cada ensaio assim como um esquema das zonas de medição. As linhas vermelhas correspondem às posições de medição, e devem ser interpretadas de baixo para cima como posição 1 até 5. A seta representa o sentido do escoamento.

Tabela 4.2: Zonas e posições de medição para cada ensaio.

	A1	A2	R2
Zona de medição			
Posição 1 (cm)	15.5	15.3	15.4
Posição 2 (cm)	18.0	18.0	17.9
Posição 3 (cm)	20.3	20.5	20.4
Posição 4 (cm)	23.0	23.0	22.9
Posição 5 (cm)	25.8	25.3	25.4

4.1.4 Topografia

No decorrer dos ensaios A1 e A2 verificou-se o aparecimento de pequenas cavidades a montante e deposições a jusante do leito junto às hastes (Figura 4.8) (detalhes em Ricardo 2008).



Figura 4.8: Aspecto do leito de areia e do efeito da erosão localizada para o ensaio A2.

A topografia do leito de areia foi determinada depois de se observar o efeito de erosão localizada, ou seja, após a execução dos ensaios A1 e A2. Utilizou-se o hidrómetro de ponta apresentado no capítulo anterior, para caracterizar a zona de medições destes ensaios. Mediram-se sobre cada posição de medição, valores espaçados de 1 cm numa extensão de 20 cm. Na Figura 4.9 mostra-se a sobreposição de cada um dos perfis longitudinais do leito de areia para os valores adquiridos.

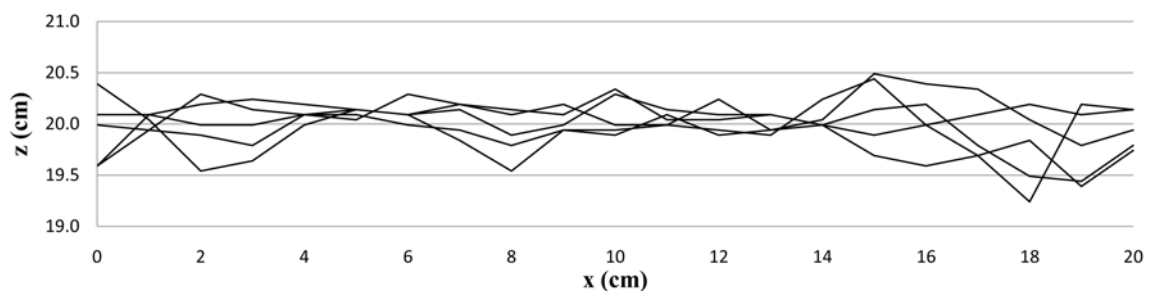


Figura 4.9: Perfis longitudinais do leito de areia de montante para jusante (Adaptado de Ricardo 2008).

O leito rugoso foi espalhado e calcado manualmente. Pretendeu-se que o leito ficasse o mais horizontal possível. Foram feitas várias medições com o sistema de laser de alta precisão apresentado no capítulo anterior. Definiu-se o sistema de aquisição Spider8® para medir e registar 100 valores da cota do leito a cada segundo, de modo a obter séries temporais do perfil topográfico. O laser foi fixo no carrinho de suporte situado no topo do canal. Empurrando o carrinho segundo a posição e direcção desejada mediram-se valores sucessivos ao longo do leito.

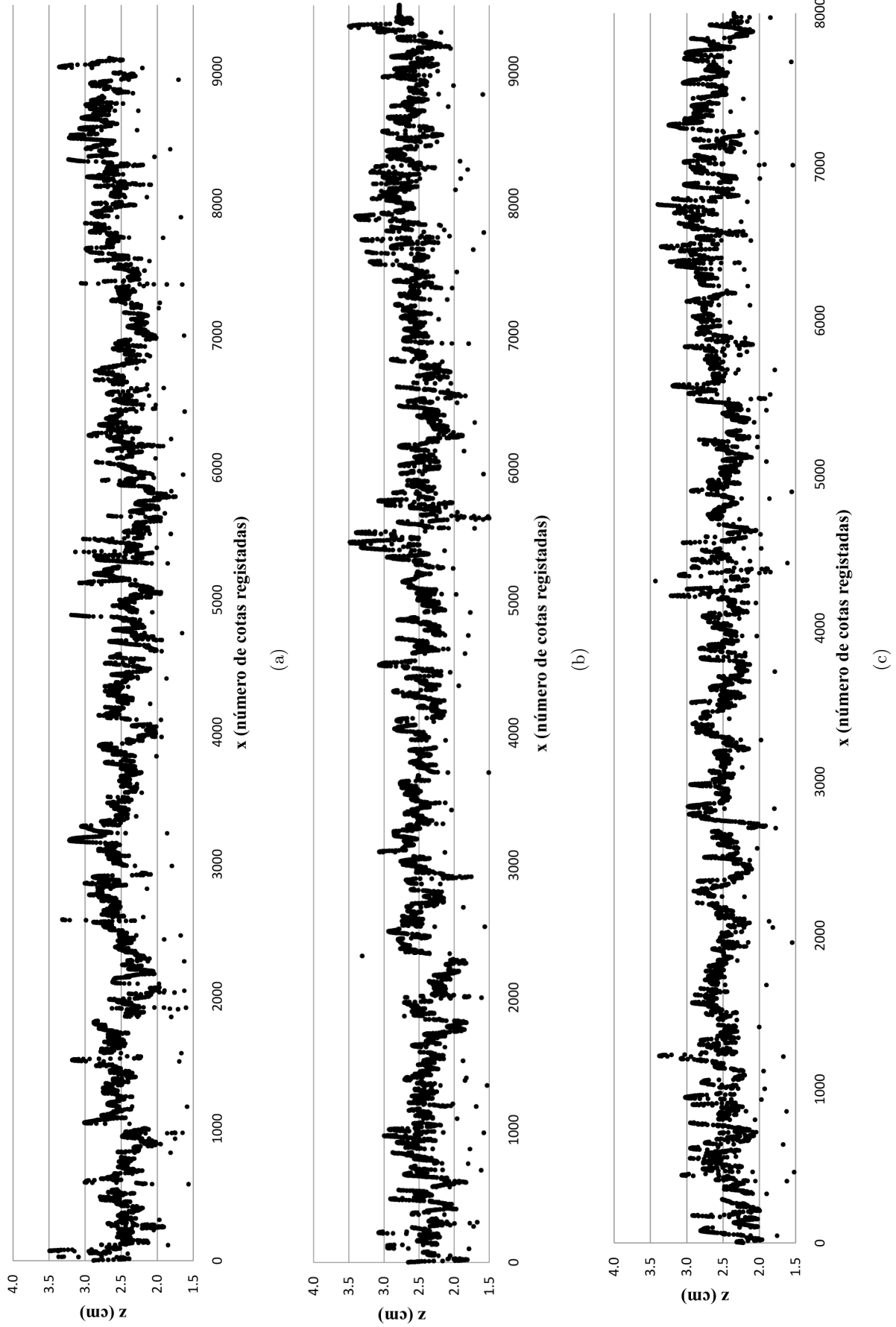


Figura 4.10: Perfis longitudinais do leito rugoso de montante para jusante, nas posições laterais da esquerda para a direita: a) 15.0 cm; b) 20.4 cm e c) 25.8 cm.

Houve uma especial atenção para que a velocidade de andamento do carrinho fosse constante e o mais regular possível entre medições. É inevitável que o laser registre valores espúrios ao passar por cima de hastes. Estes valores espúrios foram alvo de uma análise que consistiu na sua identificação e exclusão. Utilizou-se um critério simples de eliminação dos valores da base de dados acima e abaixo dos 1.5 e 3.5 cm, respectivamente.

O leito foi analisado e corrigido algumas vezes até deixar de apresentar tendências de inclinação.

Mediu-se a topografia do leito longitudinalmente em 12 posições laterais. Na Figura 4.10 apresenta-se os perfis longitudinais em três posições laterais distintas: na posição média da largura do canal (20.4 cm) e a 5.4 cm para cada lado desta. Fazendo uma análise visual dos perfis conclui-se que o leito possui uma camada de rugosidade dos 2.1 cm até 3.1 cm sensivelmente. Verifica-se uma amplitude rugosa de cerca de 1 cm.

Mediu-se a topografia do leito transversalmente em 4 posições longitudinais na zona de medição, 2 na zona M e 2 na zona J. Na Tabela 4.3 apresentam-se a média das cotas registadas para cada medição. Na Figura 4.11 podem-se observar dois perfis transversais na zona de medições.

Tabela 4.3: Posição longitudinal e média da cota registada de cada medição transversal na zona de medição do leito rugoso.

Posição longitudinal (m)	Média da cota registada (cm)
8.297	2.74
8.317	2.76
8.352	2.73
8.372	2.76

Os dois tipos de leito apresentados são distintos quanto à sua rugosidade. O leito de areia apresenta uma rugosidade de grão menor que o leito rugoso, no entanto as suas configurações geométricas do fundo são diferentes. O efeito da erosão localizada junto às hastes (Figura 4.8) para o caso do leito de areia, é traduzido por um comprimento de onda do fundo maior em comparação com o leito rugoso. O comprimento de onda do fundo para o caso do leito de areia é da ordem de grandeza do espaço inter-hastes, enquanto que no caso do leito rugoso está relacionado com o diâmetro dos elementos de seixo rolado e a forma como se dispõem no leito.

4.1.5 Superfície livre

A superfície livre foi caracterizada de formas distintas para os ensaios com leito de areia, A1 e A2, e leito rugoso, R2.

Para o leito de areia determinou-se o valor da cota da superfície livre do escoamento

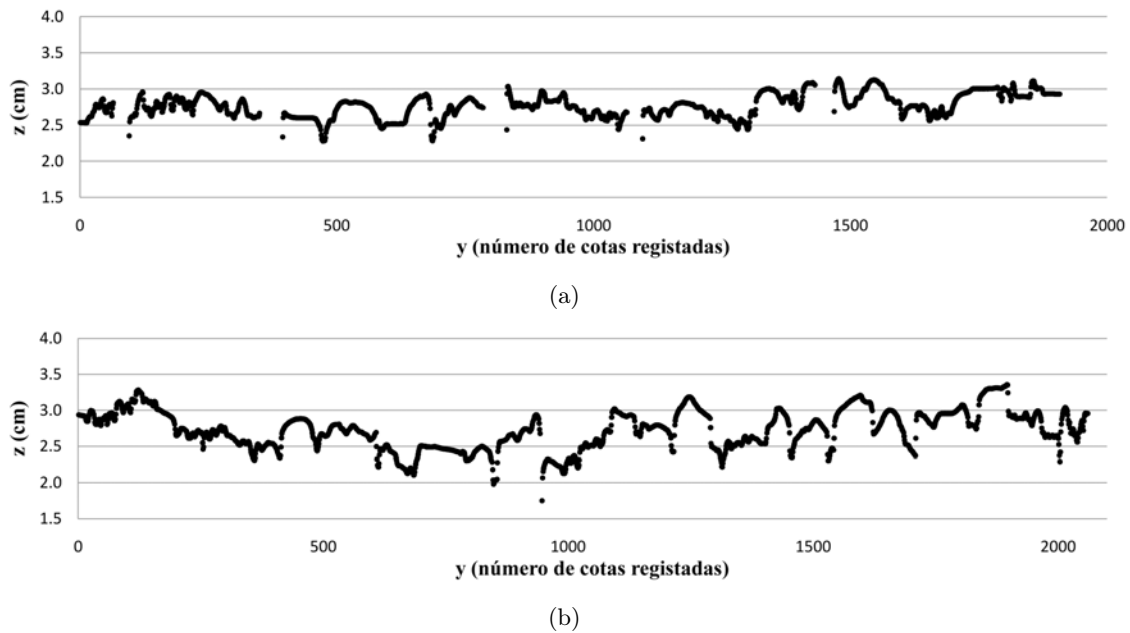


Figura 4.11: Perfis transversais do leito rugoso medidos da esquerda para a direita na zona de medições nas posições: a) 8.317 m (M) e b) 8.352 m (J).

junto à parede lateral do canal em 8 posições longitudinais para o ensaio A1 e 15 para o ensaio A2. Em cada posição, colocou-se uma régua graduada com 1.0 mm de precisão junto à parede do canal e filmou-se com uma câmara digital as oscilações de superfície livre, permitindo determinar a caracterização média temporal da superfície livre. Apresenta-se na Figura 4.12 a) e b), os valores da altura do escoamento registadas ao longo do canal, bem como a sua linha de tendência.

No caso do leito rugoso, mediu-se a altura de escoamento recorrendo ao mesmo sistema de medição utilizado na determinação da topografia do leito. Foram registadas as variações de altura subsequentes das oscilações da superfície livre para 21 posições longitudinais na posição média lateral (20.4 cm). Foi colocada na superfície livre uma película de acetato que acompanha a superfície livre, de modo a permitir ao laser registar os sucessivos valores que esta adquire. Desta forma, para cada medição obteve-se com precisão uma série temporal com a variação de valores da superfície livre (Figura 4.13). Com o valor médio de cada uma destas séries, foi possível construir um perfil longitudinal da superfície livre (Figura 4.12 c)). Na zona de medição, foram medidos 2 perfis transversais para caracterizar a sua altura de escoamento (Figura 4.14). Os valores médios medidos na transversal da zona de medição, também foram utilizados no perfil longitudinal.

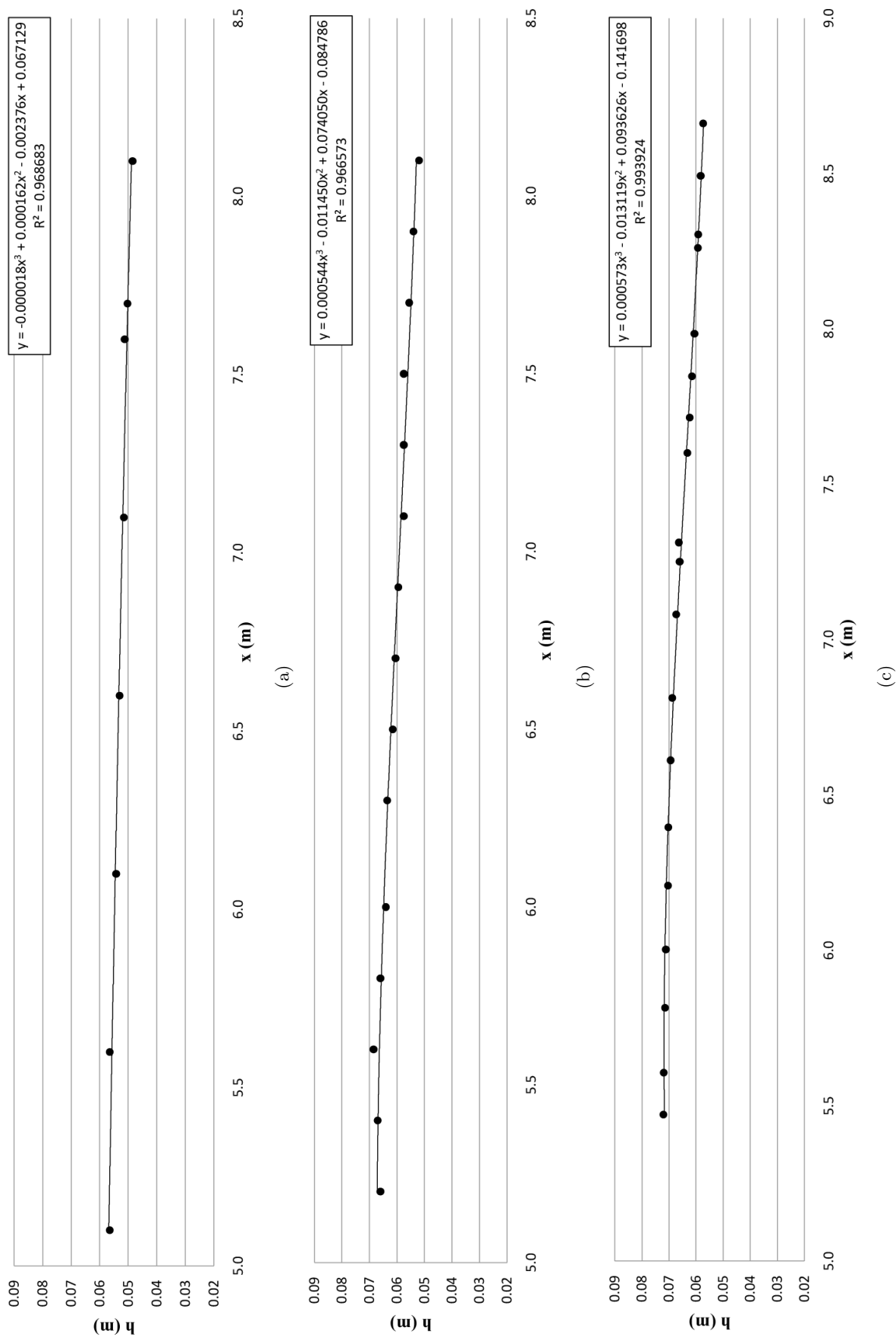


Figura 4.12: Perfis longitudinais da altura do escoamento e respectiva linha de tendência para os ensaios: a) A1; b) A2 e c) R2.

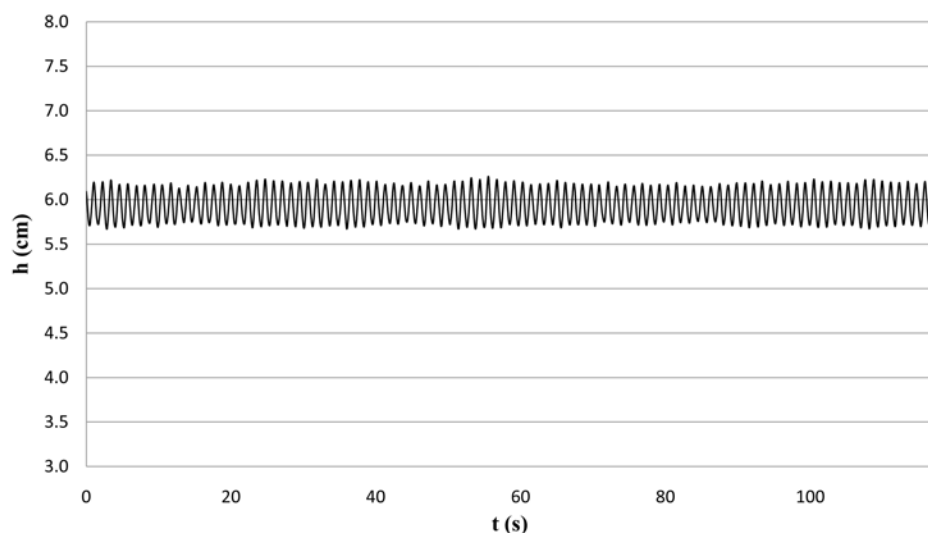


Figura 4.13: Série temporal da variação de altura de escoamento na posição média lateral (20.4 cm) e a 8.301 m do início do canal.

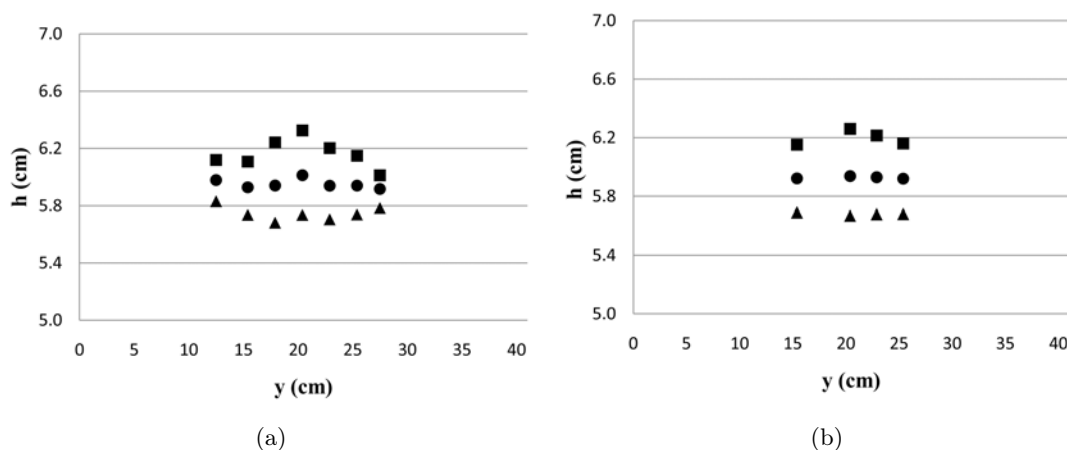


Figura 4.14: Perfis transversais da altura do escoamento para valores máximos (■), mínimos (▲) e médios (•), na zona de medição, posições: a) $x = 8.301$ m e b) $x = 8.365$ m.

Na Tabela (4.4), apresenta-se a posição longitudinal x na zona de medição, a respectiva altura do escoamento médio h (medida em relação à cota média do leito) e o gradiente longitudinal do escoamento para cada ensaio dh/dx . Os gradientes de superfície livre (dh/dx), foram obtidos calculando o declive total da zona povoada por hastes ao longo do canal.

Tabela 4.4: Caracterização média da superfície livre para cada ensaio.

	A1	A2	R2
x (m)	7.669	7.669	8.283
h (cm)	5.0	5.5	5.9
dh/dx	-0.00267	-0.00483	-0.00363

4.1.6 Função de vazios

A função de vazios, $\psi(z)$, é determinada a partir da relação entre a área ocupada por fluido na área de controlo (A_f) e a área total (A_0) para cada cota, de acordo com a equação (2.11).

De acordo com a descrição feita no capítulo 2 (Figura 2.6), calculou-se a função de vazios para três zonas distintas de variação da função de vazios, A, B e C. Devido à natureza discreta dos dados recolhidos para caracterizar a topografia do leito e as cotas da superfície livre, o cálculo da função de vazios foi efectuado da seguinte forma:

$$\psi(z) = \frac{N_z}{N_t} \quad (4.1)$$

onde N_t é o número total de pontos medidos e N_z é, para o caso do leito, o número de pontos medidos cuja cota é inferior a z e no caso da superfície livre, é o número de pontos medidos cuja cota é superior a z . Neste trabalho a função de vazios foi determinada com uma discretização vertical de 0.065 cm.

Na Figura 4.15 mostra-se a função de vazios para cada ensaio, assim como uma sobreposição dos três ensaios. Uma vez que os ensaios apresentam alturas de escoamento diferentes, a sobreposição da função de vazios para os vários ensaios requer a adimensionalização das cotas, z . Considerou-se uma adimensionalização através da altura da coluna de água controlada pelas hastes, H (ver discussão da Figura 6.10). Na Tabela 4.5 mostram-se os valores de H obtidos para cada ensaio.

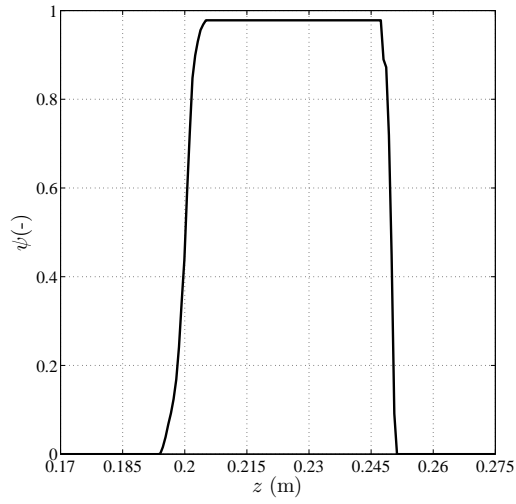
Tabela 4.5: Factor de adimensionalização H .

	A1	A2	R2
H (m)	0.0468	0.0487	0.0566

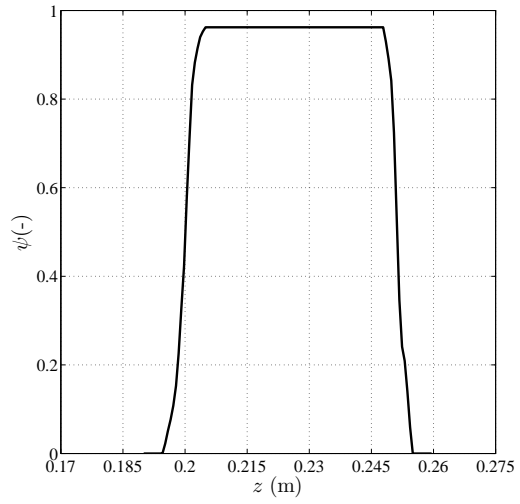
A observação do gráfico da Figura 4.15 d), permite verificar que a amplitude das oscilações do leito, definida como a distância vertical entre cavas e cristas, é idêntica em todos os ensaios. A amplitude das oscilações da superfície livre é maior no ensaio A2. A camada limite originada pelo fundo está mais bem desenvolvida nos ensaios com leito de areia. Existe uma distância maior entre a cava mais profunda e o plano que marca o início do escoamento controlado pelas hastes. O escoamento controlado apenas pelas hastes ocupa uma maior amplitude do leito para o ensaio com leito rugoso em comparação com os ensaios de leito de areia.

4.2 Procedimento experimental

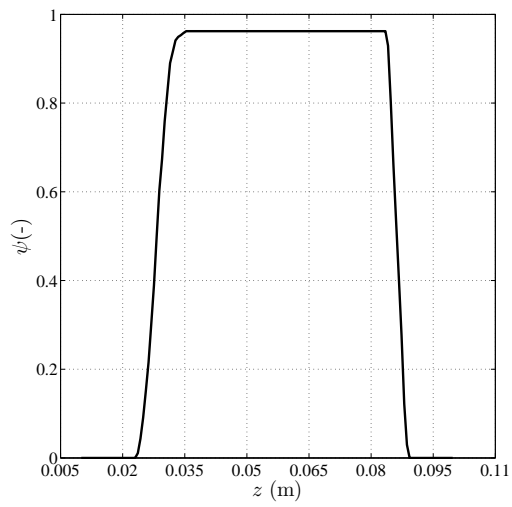
O procedimento experimental é idêntico para os três tipos de ensaio realizados. O caudal é controlado e mantido constante ao longo dos ensaios. Para evitar o enviesamento da imagem, a câmara é posicionada perpendicularmente ao vidro lateral do canal, e mantida



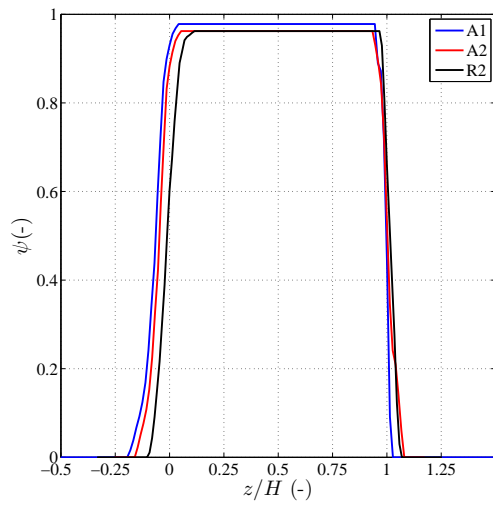
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.15: Função de vazios para os ensaios: a) A1; b) A2; c) R2 e d) para a sobreposição da função de vazios dos três ensaios.

completamente horizontal com a ajuda de um nível digital (Figura 4.16). A secção de medição deve ser captada incluindo a superfície livre e o leito.



Figura 4.16: Nível digital.

É necessário proceder à calibração antes da aquisição de cada posição. Os campos de deslocamentos obtidos pelo sistema PIV em pixeis, devem ser convertidos para as unidades do Sistema Internacional (metros), através de um factor de calibração. O factor de calibração representa a relação entre uma determinada distância em metros e em pixeis para a secção em questão. Para obter esta distância, procede-se ao registo de uma imagem com uma régua graduada colocada na secção de medição (Figura 4.17). Desta forma o factor de calibração, F_c , vem dado por:

$$F_c = \frac{\Delta d[m]}{\Delta d[px]} \quad (4.2)$$

Onde $\Delta d[m]$ é a distância em metros e $\Delta d[px]$ é a distância correspondente em pixeis. Para obter as coordenadas métricas de todos os pontos de uma imagem, basta multiplicá-los pelo factor de calibração. Na tabela 4.6 mostram-se os factores de calibração (F_c) para cada ensaio para as posições de medição da tabela 4.2.

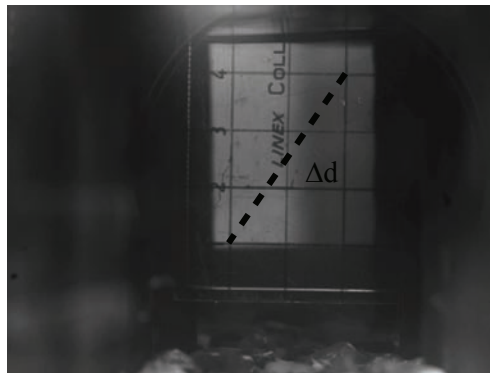


Figura 4.17: Imagem da régua de calibração para o ensaio R2, posição lateral 25.4 cm. A linha a tracejado representa a distância Δd .

O laser é montado no carrinho de suporte, e posicionado na posição a medir. A cabeça do laser é alinhada manualmente.

No software de aquisição DynamicStudio[®] são definidas as variáveis do processo de aquisição para cada ensaio (Figura 4.18). Estas são o intervalo de tempo entre impulsos, a

Tabela 4.6: Valores do factor de calibração, F_c ($\times 10^{-3}$ cm/pixel).

	A1	A2	R2 (M)	R2 (J)
Posição 1	6.67	6.51	4.84	4.91
Posição 2	6.85	6.78	5.07	5.17
Posição 3	6.92	7.02	5.15	5.50
Posição 4	7.30	7.31	5.40	5.24
Posição 5	7.50	7.53	5.53	5.43

frequência de aquisição e o número de imagens registadas. Na Tabela 4.7 resume-se o valor destas variáveis para cada tipo de ensaio. O modo de disparo do laser do sistema PIV também pode ser controlado pelo software de aquisição. Deve ser seleccionada a opção *Double Frame Mode*, que permite o disparo de dois feixes de luz alternados.

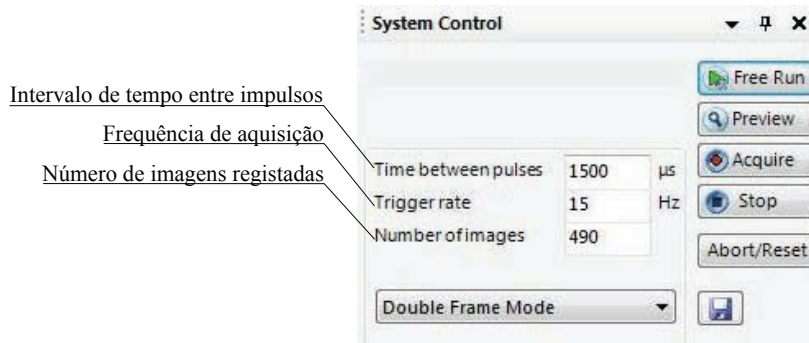


Figura 4.18: Definição de variáveis de aquisição no sistema de controlo do DynamicStudio®.

Analizou-se a sensibilidade dos resultados ao tempo entre impulsos, efectuando quatro medições para diferentes valores de tempo entre impulsos, de 750 a 2000 μs , mantendo constante a quantidade de *seeding* e as condições do escoamento. A Figura 4.19 mostra a sobreposição de cada perfil de velocidade longitudinal média. Concluiu-se que para a gama de valores testados os resultados não são muito sensíveis ao intervalo de tempo entre pulsos de laser. Como já foi referido no capítulo anterior o tempo de intervalo entre impulsos deve permitir um deslocamento das partículas iluminadas de cerca de 25 % do lado da área de interrogação. Assim, com base nesta regra prática, escolheu-se para esta variável um valor de 1500 μs para todos os ensaios.

Outra variável comum aos três tipos de ensaios é o número de pares de imagem registadas por unidade de tempo, ou seja, a frequência de aquisição. Esta variável é directamente proporcional ao nível de pormenorização que se quer para estudar o escoamento turbulento, conduzindo a resultados tanto melhores quanto maior fôr o seu valor. Utilizou-se a frequência máxima permitida pelo equipamento de medição de 15 Hz.

A Tabela 4.7 mostra as variáveis utilizadas para cada ensaio. O número de pares de imagens registadas é referente a cada aquisição realizada. Este factor é condicionado pela

capacidade de memória RAM do computador em operação e está limitado aos valores máximos admitidos pelo sistema.

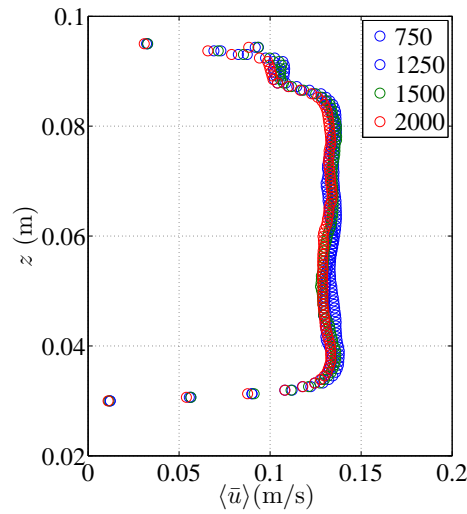


Figura 4.19: Perfis de velocidade longitudinal média espaço-temporal, $\langle \bar{u} \rangle$, para diferentes valores de tempo entre impulsos.

Tabela 4.7: Variáveis para cada tipo de ensaio.

	A1	A2	R2 (M)	R2 (J)
Número de aquisições por posição	12	12	21	21
Intervalo de tempo entre impulsos (μs)	1500	1500	1500	1500
Frequência de aquisição (Hz)	15	15	15	15
Número de imagens registradas	490	490	486	486

Antes de cada aquisição, é introduzida uma pequena quantidade de *seeding* ao escoamento por gravidade, e já em mistura com água através de um funil situado na estrutura de entrada (Figura 4.20 a)). Esta quantidade deve ser tal, que garanta uma densidade de partículas adequada na zona de investigação. A jusante ainda se encontra um conjunto de três malhas de pequena dimensão que permitem homogeneizar o campo turbulento, e a passagem do *seeding* até à região de investigação (Figura 4.20 b)).

É necessário ter muito cuidado com a quantidade de luz incidente na câmara. O sensor CCD é extremamente sensível à luz e intensidades luminosas muito altas podem danificar o sensor CCD. Por isso, no início de cada ensaio deve-se começar com uma baixa potência da fonte luminosa, ou fechar o diafragma da câmara (Raffel *et al.* 1998, pp.81-82).

Durante todos os ensaios, foi necessário colocar na superfície livre da zona a medir uma película transparente (folha de acetato). Este procedimento deve-se essencialmente a evitar a difracção do feixe de laser mantendo a sua integridade quando este passa pela fronteira definida pela superfície livre (ar/água). As pequenas perturbações na superfí-

cie livre conduzem ao aparecimento de zonas de sombra e zonas sobressaturadas de luz (convergência e divergência do plano de luz), o que leva a erros na correlação. A superfície livre pouco perturbada é uma condição necessária para a utilização da técnica de medição PIV.

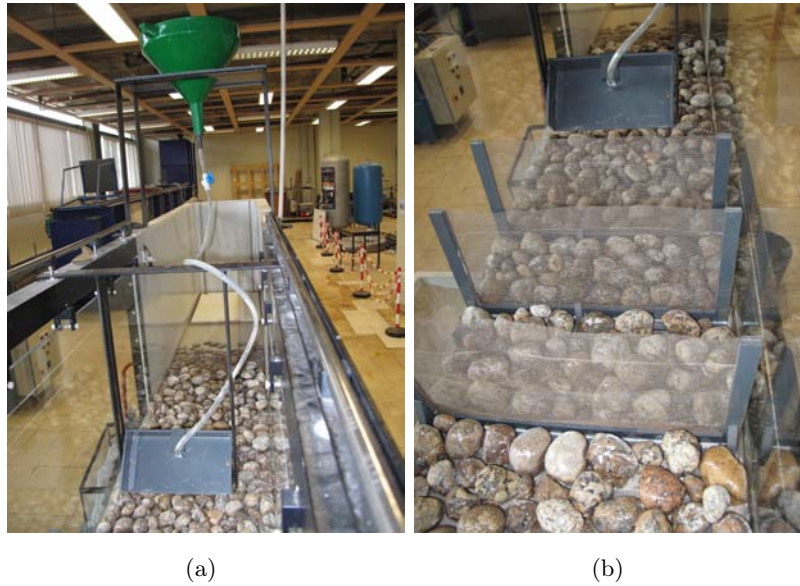


Figura 4.20: Sistema de introdução de *seeding* no canal: a) funil; b) malhas de pequena dimensão.

Capítulo 5

Escoamento médio temporal

5.1 Considerações gerais

Neste capítulo, pretende-se descrever o tratamento da base de dados adquirida no trabalho laboratorial, até à obtenção das quantidades turbulentas médias temporais presentes no escoamento.

É necessária uma gestão de tempo e espaço para processar e armazenar os dados. O processo de aquisição, armazenamento, tratamento e posterior exportação dos dados é um processo moroso. Para um PC de duplo processador a 2.5 GHz, esta tarefa ocupa cerca de 2 horas por aquisição. A totalidade do tratamento de dados teve a duração de cerca de 3 meses. O armazenamento de cada aquisição realizada ocupa cerca de 3.0 Gb de espaço. Perfazendo um total de cerca de 1000 Gb para todas as aquisições. A base de dados adquirida deve possuir informação suficiente para garantir a qualidade dos resultados, num prazo de tempo aceitável.

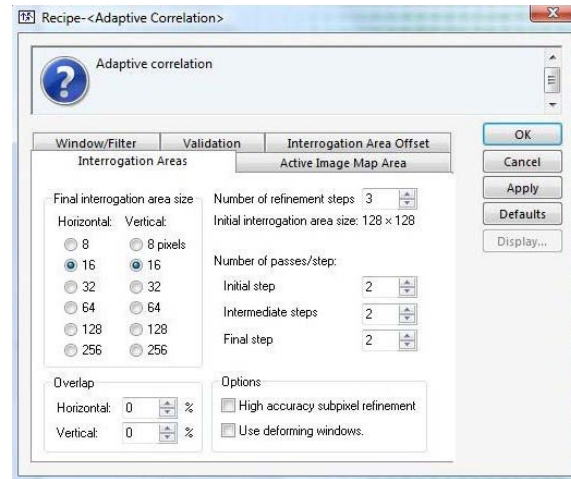
O tratamento de dados é efectuado em duas fases distintas. A primeira onde é feito um tratamento base no software de aquisição DynamicStudio[®] de modo a obter mapas de velocidades instantâneas. E uma segunda fase onde se obtêm mapas velocidades médias temporais e tensões tangenciais de Reynolds, como também os perfis de escoamento médio temporal que constituem os dados para a aplicação da metodologia de média dupla espaço-temporal. Este processo foi realizado recorrendo ao software MATLAB[®].

5.2 Velocidades instantâneas

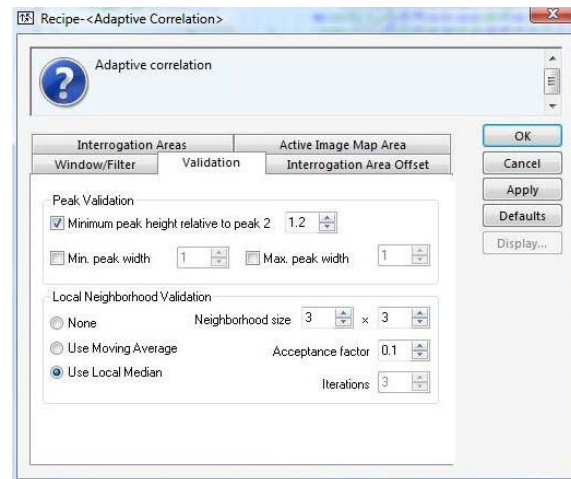
Após a realização dos ensaios laboratoriais com o sistema PIV, armazenou-se toda a informação em discos rígidos. Os conjuntos de pares de imagens digitais obtidas para cada ensaio foram posteriormente processadas no software de aquisição DynamicStudio[®].

O tratamento de dados tem início com a aplicação de um algoritmo de correlação em cada área de interrogação de cada par de imagens. Tendo em conta o sub-capítulo

3.4.2., estabeleceu-se que seria adequado utilizar áreas de interrogação com dimensão de 16×16 pixels, cerca de 1.1×1.1 mm. Utilizou-se a correlação recursiva que como já se explicou, conduz a resultados mais fiáveis (ver sub-capítulo 3.4.1). Aplicou-se, o método de validação baseado na mediana local para corrigir eventuais vectores erróneos. Na Figura 5.1 mostram-se as definições para aplicação destes factores no software de aquisição. A Figura 3.16 a) corresponde a um mapa de velocidade instantânea assim processado.



(a)



(b)

Figura 5.1: Janelas do software DynamicStudio[®] para definição de: a) áreas de interrogação e b) tipo de validação.

5.3 Velocidades médias temporais e tensões tangenciais de Reynolds

Para proceder ao tratamento dos campos de velocidades médias temporais e tensões tangenciais de Reynolds, é necessário seleccionar a área visível de escoamento para cada posição de medição. Através da elaboração de uma máscara, é definida a zona na imagem de medição,

cujos vectores não serão considerados para os resultados. Na Figura 5.2 a), apresenta-se um exemplo de uma imagem mascarada. A zona a vermelho corresponde à área excluída no processo de cálculo. As suas fronteiras são a superfície livre superiormente, o leito inferiormente e hastes lateralmente.

É necessário também posicionar a imagem em relação aos eixos do referencial global, sendo a cota z a distância na vertical em relação ao fundo do canal, e x a distância na longitudinal em relação à entrada do canal. Para ajustar a cota z , colocou-se no campo de visão da câmara um ponteiro referenciado ao fundo do canal. Um exemplo de registo desta imagem é apresentado na Figura 5.2 b). A distância x é ajustada através da utilização de uma placa de PVC com papel milimétrico e marcas inscritas manualmente. Esta placa é colada à parede lateral do canal, sempre que a câmara é posicionada de novo, como forma de referenciar a posição longitudinal x de cada imagem captada por posição.



(a)



(b)

Figura 5.2: Exemplo de imagem captada pela câmara para o ensaio R2 (M) na posição 3: a) mascarada b) com ponteiro (cuja ponta se encontra a 7.07 cm do fundo do canal).

Os mapas de velocidade média temporal, $\bar{v}(x, z)$ são definidos por:

$$\bar{v}(x, z) = \frac{1}{NI} \sum_{i=1}^{NI} v_i(x, z) \quad (5.1)$$

onde NI é o número de mapas instantâneos recolhidos em cada aquisição e $v_i(x, z)$ é o campo de velocidade instantânea i .

Na Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3 apresentam-se os mapas de velocidade média temporal para o número total de aquisições por posição (ver Tabela 4.7) dos ensaios A1, A2 e R2. Também se mostra a posição de medição correspondente a cada mapa. Aplicando o factor de calibração (F_c) da Tabela 4.6 obtêm-se os campos de velocidade em unidades SI (m/s).

No capítulo 2 mostrou-se que a tensão tangencial de Reynolds, τ_{Re} , é definida por:

$$\tau_{Re} = -\rho \overline{u'w'} \quad (5.2)$$

onde u' e w' são as componentes longitudinal e vertical de flutuação da velocidade em relação ao seu valor médio temporal. O valor de $\overline{u'w'}$ é expresso por:

$$\overline{u'w'} = \frac{1}{NI} \sum_{i=1}^{NI} (u_i - \bar{u})(w_i - \bar{w}) \quad (5.3)$$

e sabendo que a covariância não enviesada de uma amostra finita é dada por (Pope 2000, p.57):

$$Cov_{u,w} = \frac{1}{NI-1} \sum_{i=1}^{NI} (u_i - \bar{u})(w_i - \bar{w}) \quad (5.4)$$

conclui-se que

$$\overline{u'w'} = \frac{NI-1}{NI} Cov_{u,w} \quad (5.5)$$

A covariância também pode ser definida em função do desvio padrão de cada variável, σ_u e σ_w , e do coeficiente de correlação, ρ_{corr} , sendo $Cov_{u,w} = \rho_{corr}\sigma_u\sigma_w$. Estes valores são calculados pelo DynamicStudio[®] e exportados à semelhança das componentes de velocidade média. Assim, obteve-se a tensão tangencial de Reynolds através de:

$$\tau_{Re} = -\rho \frac{NI-1}{NI} \rho_{corr} \sigma_u \sigma_w \quad (5.6)$$

Na Tabelas 5.4, 5.5 e 5.6 apresentam-se mapas de tensão tangencial de Reynolds para os ensaios A1, A2 e R2. Também se mostra a posição de medição correspondente a cada mapa.

Tabela 5.1: Mapas de velocidade média temporal para o ensaio A1 em unidades SI (m/s).

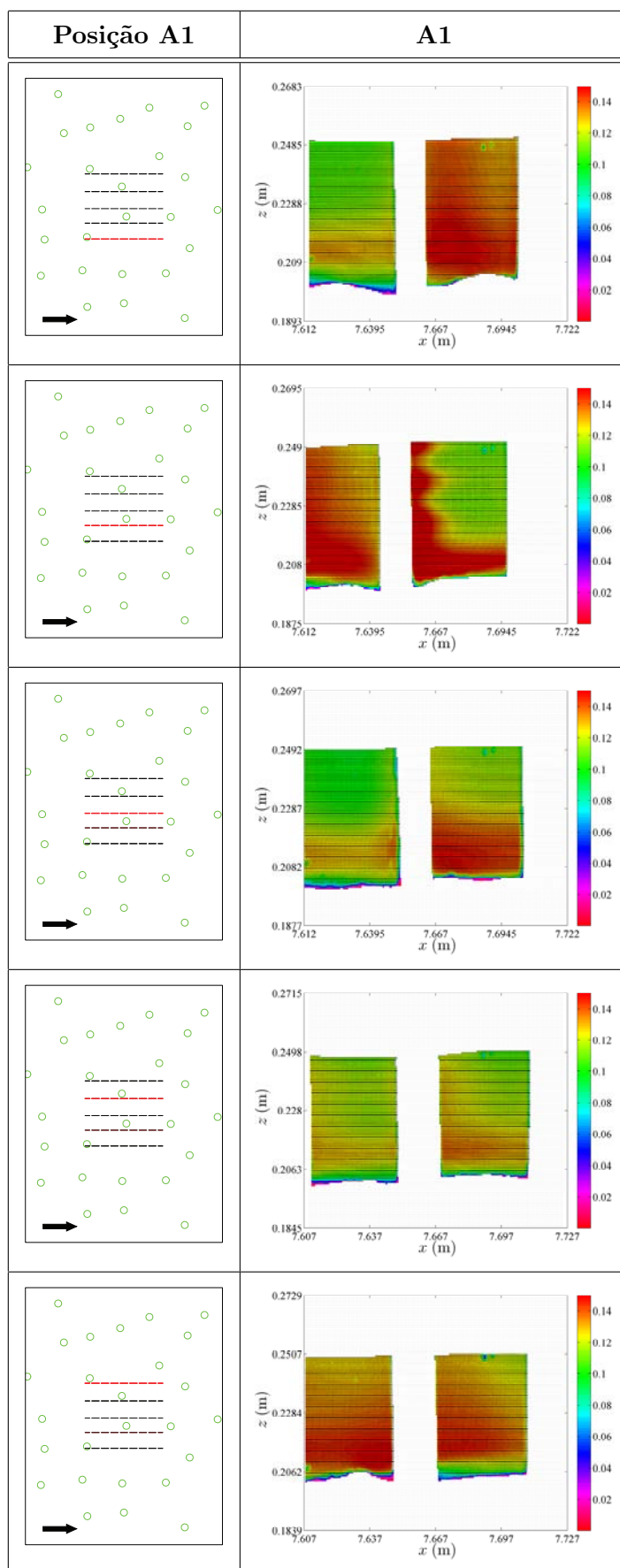


Tabela 5.2: Mapas de velocidade média temporal para o ensaio A2 em unidades SI (m/s).

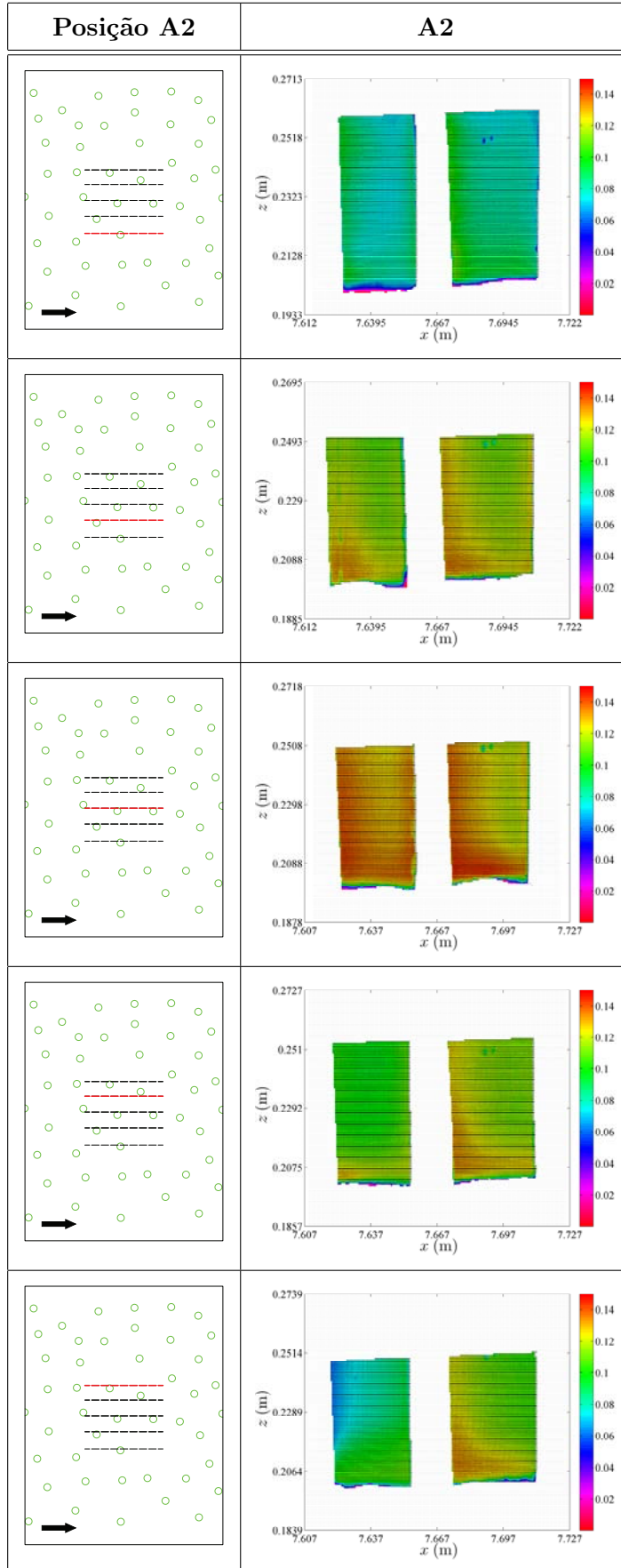


Tabela 5.3: Mapas de velocidade média temporal para o ensaio R2 em unidades SI (m/s).

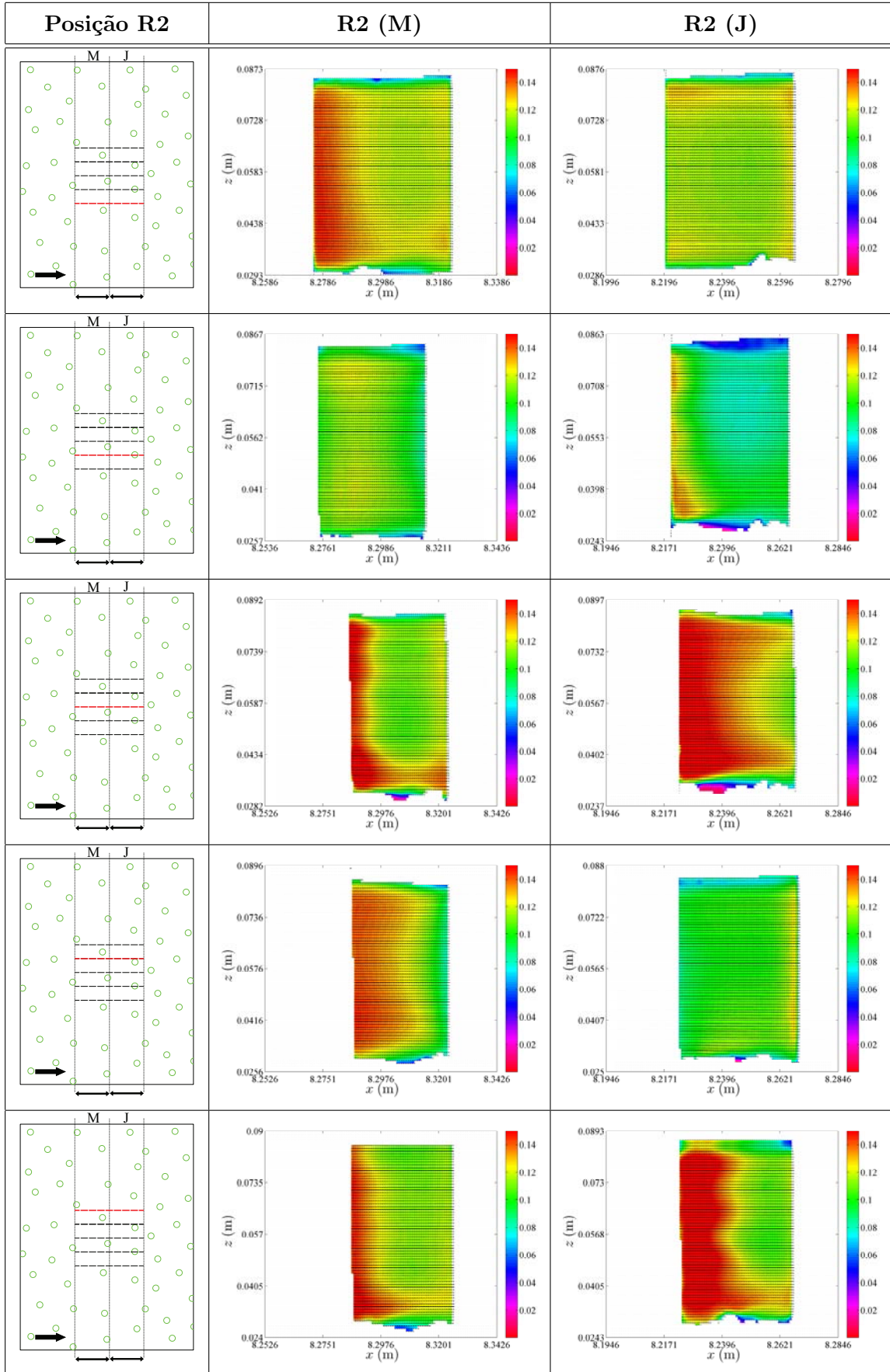


Tabela 5.4: Mapas de tensão tangencial de Reynolds para o ensaio A1 em unidades SI (Pa).

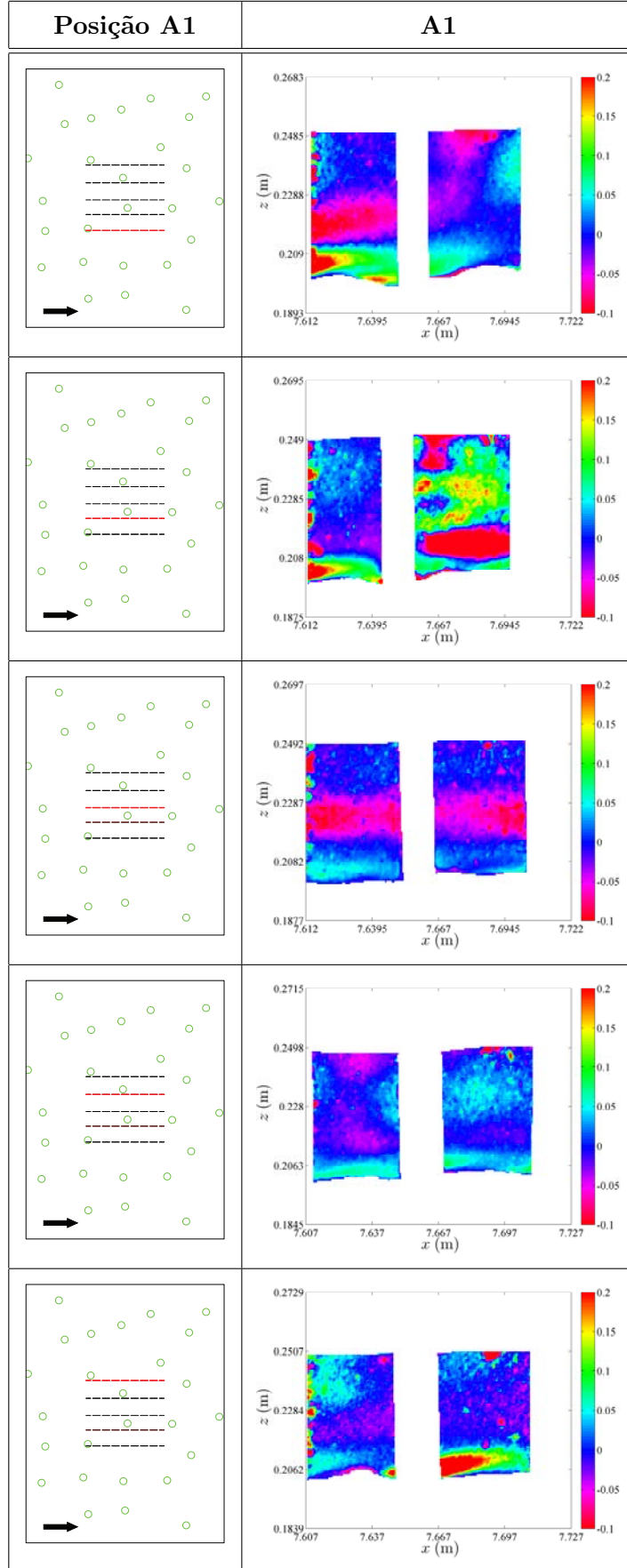


Tabela 5.5: Mapas de tensão tangencial de Reynolds para o ensaio A2 em unidades SI (Pa).

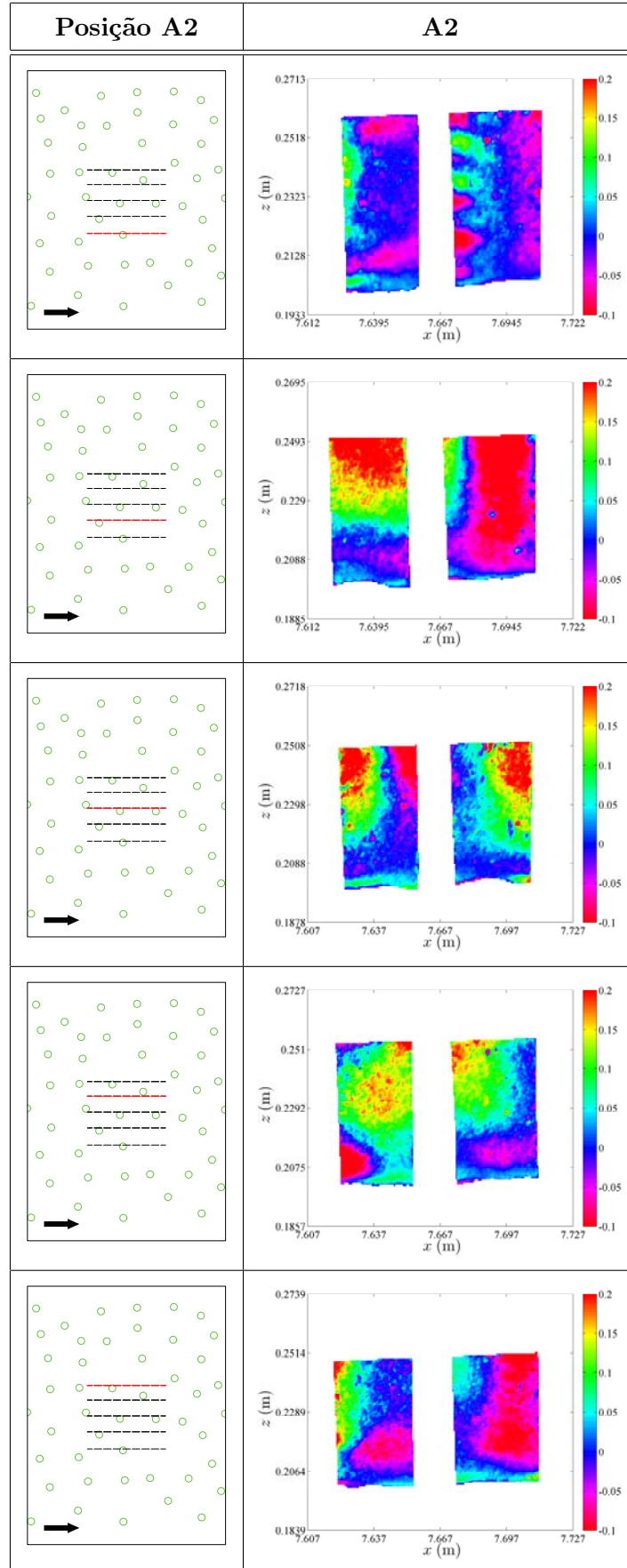
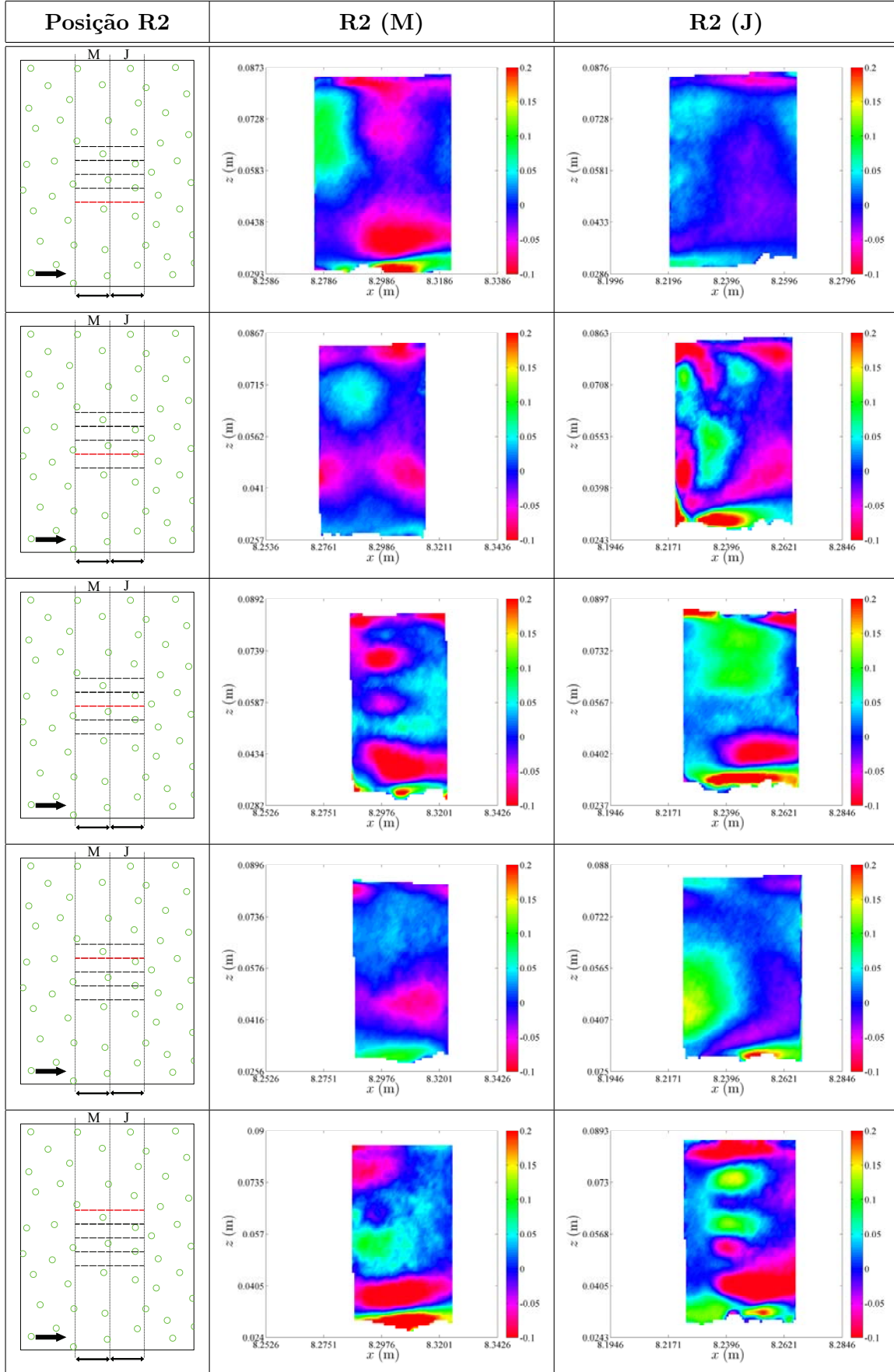


Tabela 5.6: Mapas de tensão tangencial de Reynolds para o ensaio R2 em unidades SI (Pa).



5.4 Perfis de escoamento médio temporal

Para caracterizar as variações espaciais do escoamento deve-se calcular a média espacial das quantidades turbulentas de perfis médios temporais. São estes perfis que constituem os dados a utilizar na metodologia de média dupla espaço-temporal. A densidade de amostragem de perfis deve ser tanto maior quanto possível para garantir uma maior qualidade na caracterização do escoamento. Cada perfil é composto pelos valores das variáveis médias temporais ao longo da coluna de água para uma área de interrogação, sendo as coordenadas de cada perfil conhecidas. Para os ensaios A1, A2 e R2 correspondem 687, 622 e 522 perfis respectivamente.

Na Figura 5.3, apresenta-se a localização dos perfis em planta, assim como a sua área de influência calculada pelo método dos polígonos de Voronoï (Okabe *et al.* 2000, pp.43-47). Os pontos a vermelho representam pontos fictícios acrescentados de forma a limitar a influência de cada perfil em áreas iguais. Deste modo, são criadas áreas fictícias que não serão consideradas no cálculo da média espacial, como por exemplo zonas onde se encontram hastes.

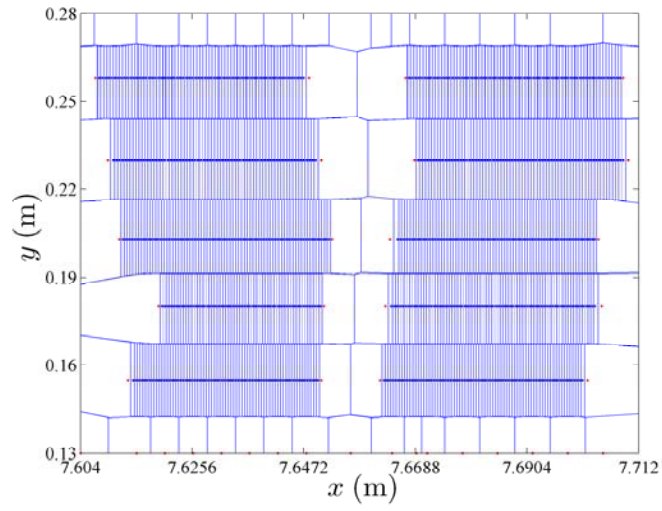
Os perfis médios temporais das quantidades utilizadas para cada ensaio são apresentadas nas figuras 5.4, 5.5 e 5.6, onde \bar{u} representa a velocidade longitudinal, \bar{w} a velocidade vertical, $\sqrt{\overline{u'^2}}$ a intensidade turbulenta longitudinal, $\sqrt{\overline{w'^2}}$ a intensidade turbulenta vertical, $-\rho\overline{u'w'}$ a tensão tangencial de Reynolds e $\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}$ o gradiente vertical da velocidade longitudinal.

Observando a sobreposição dos perfis médios temporais é perceptível a existência de uma gama relativamente larga de valores das várias variáveis do escoamento, evidenciando a grande variabilidade espacial dos escoamentos no interior de zonas povoadas com vegetação rígida.

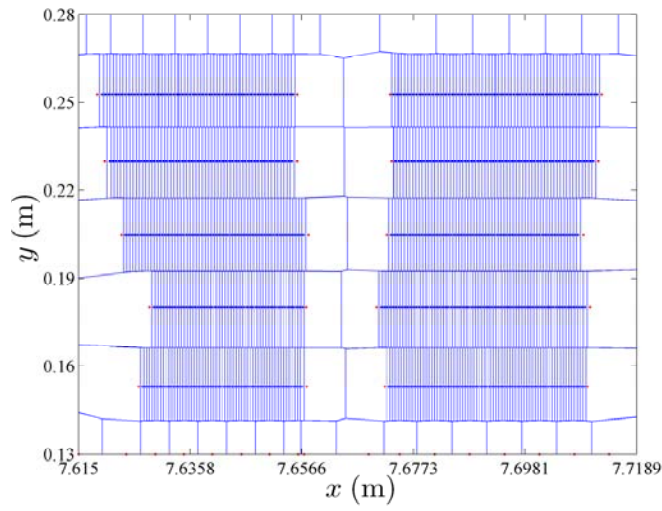
Ao longo da coluna de água nota-se uma maior uniformidade de distribuição e concentração dos perfis de velocidade longitudinal para os ensaios com maior densidade de hastes (Figuras 5.5 e 5.6 para os ensaios A2 e R2, respectivamente). Em contrapartida, para um maior afastamento entre hastes (Figura 5.4 para o ensaio A1), existe uma maior estratificação do escoamento observando-se maiores valores de velocidade para uma faixa de variação irregular e dispersa.

Analisando os perfis de velocidade vertical, identifica-se uma elevada heterogeneidade espacial junto ao leito. Na superfície livre, destaca-se também a heterogeneidade espacial do leito rugoso.

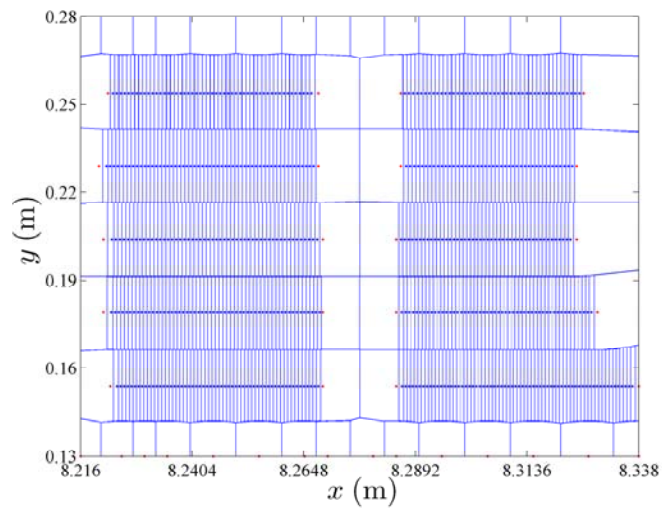
Em geral, maior distância entre hastes conduz a uma maior heterogeneidade espacial do escoamento (ver Figuras 5.4 e 5.5). Segundo White & Nepf 2003, junto e a jusante de cada haste o escoamento é muito perturbado e apresenta uma configuração semelhante à de um obstáculo emerso e isolado. Uma diminuição do afastamento entre hastes, conduz a maior eficácia da dispersão não turbulenta, tornando o escoamento menos heterogéneo.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.3: Diagrama de polígonos de Voronoï com a localização espacial do perfis e a sua área de influência para os ensaios: a) A1 (687 perfis); b) A2 (622 perfis) e c) R2 (522 perfis).

Para uma mesma densidade de hastes, observa-se uma maior heterogeneidade das tensões tangenciais de Reynolds para o ensaio com leito de areia (Figura 5.5), devido ao maior comprimento de onda de formas do fundo (Figura 4.8), comparando com o ensaio de leito rugoso (Figura 5.6).

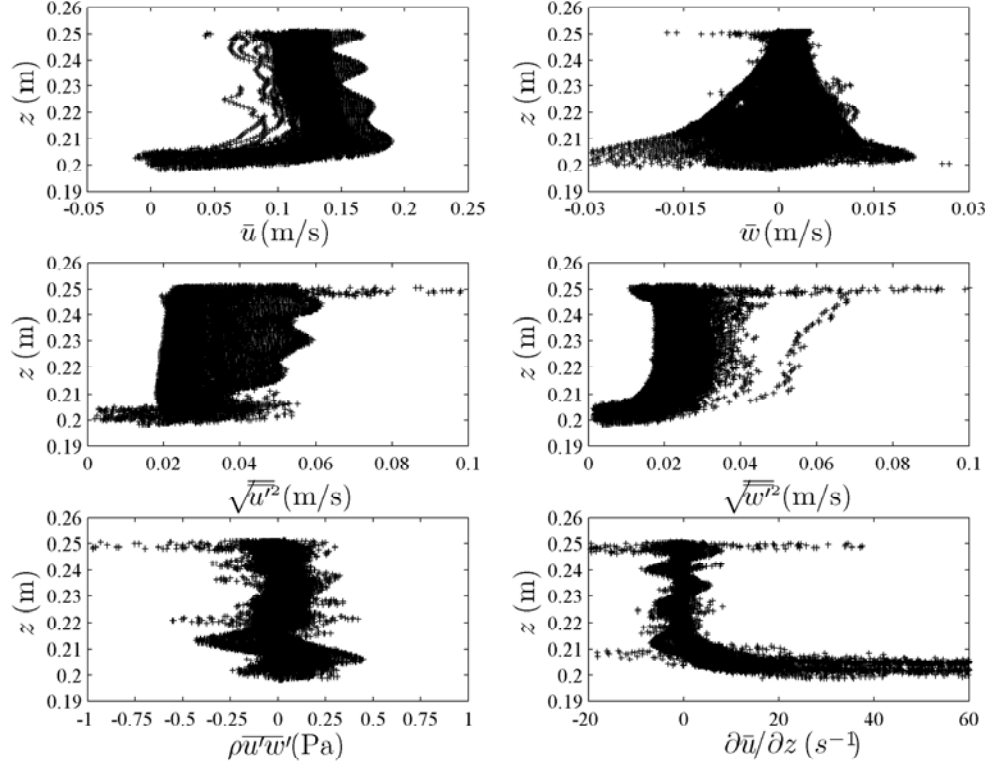


Figura 5.4: Quantidades médias temporais dos 687 perfis aplicados na DAM para o ensaio A1.

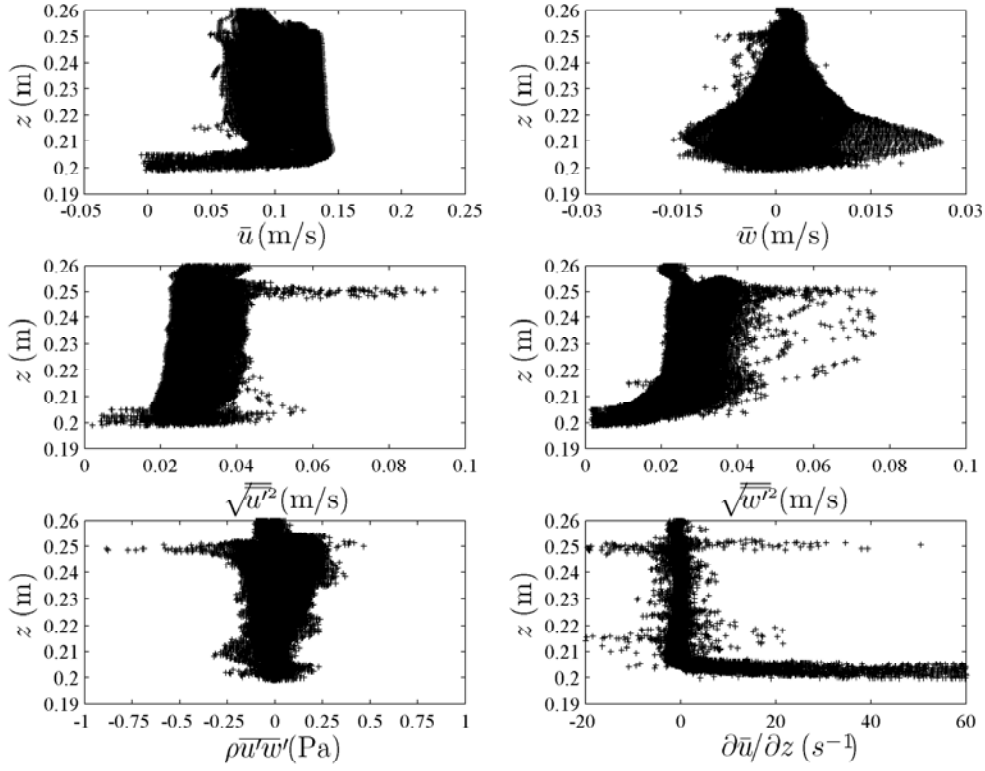


Figura 5.5: Quantidades médias temporais dos 622 perfis aplicados na DAM para o ensaio A2.

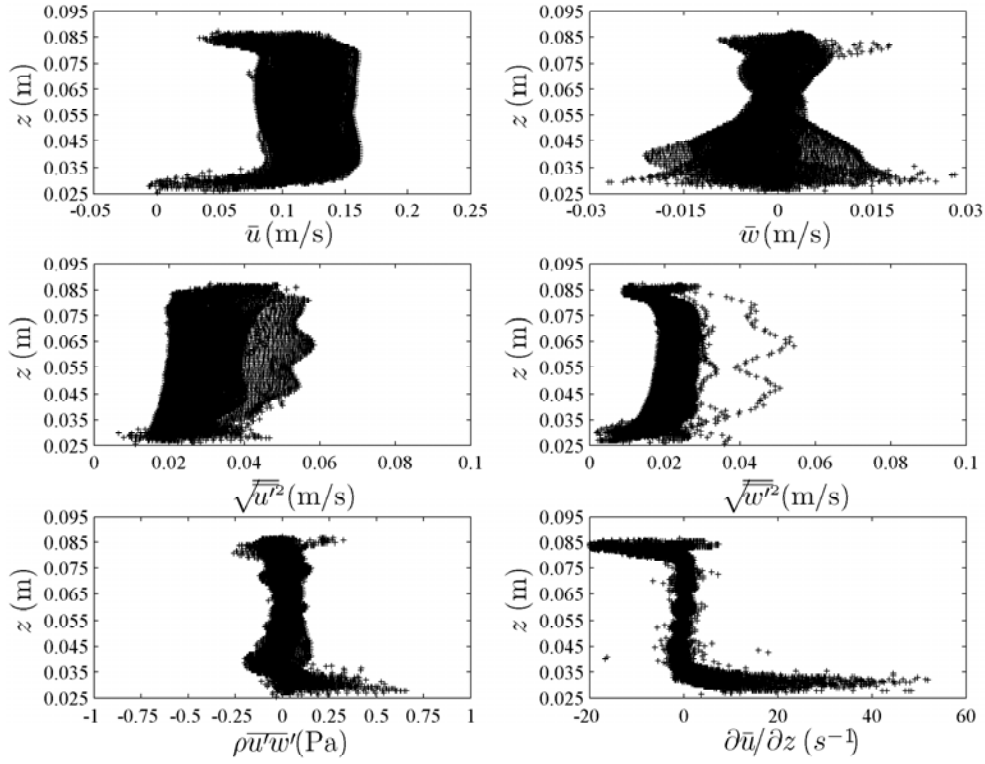


Figura 5.6: Quantidades médias temporais dos 522 perfis aplicados na DAM para o ensaio R2.

Capítulo 6

Escoamento médio espaço-temporal

6.1 Perfis de média dupla espaço-temporal

Como se observou no sub-capítulo anterior, existe uma elevada variabilidade espacial dos perfis de escoamento médio temporal. Torna-se fundamental a aplicação da metodologia de média dupla espaço-temporal para caracterizar o escoamento em termos médios, de acordo com a descrição feita no capítulo 2.3.

No entanto, a definição (2.7) não tem aplicação prática para o caso desta dissertação, onde existem dados espacialmente discretos constituídos por perfis de escoamento médio temporal obtidos para um número finito de pontos numa dada área do canal. Assim, a média espacial para uma variável genérica média no tempo, $\bar{\theta}$, a uma determinada cota z é dada por (Ferreira *et al.* 2010):

$$\langle \bar{\theta} \rangle (z) \approx \frac{\sum_{k=1}^{N-N_0(z)} \bar{\theta}_k(z) A_k(z)}{\sum_{k=1}^{N-N_0(z)} A_k(z)} \quad (6.1)$$

onde $A_k(z)$ é a área do sub-domínio convexo Ω_k , definida como a área de influência de $(x_k, y_k) \in]0, L_x[\times]0, L_y[$, N corresponde ao número total de sub-domínios e $N_0(z)$ ao número de sub-domínios, à cota z , para o qual a variável do escoamento não está definida em (x_k, y_k) . Deve notar-se que $\sum_{k=1}^{N-N_0(z)} A_k(z) < A(z)$ para $N_0(z) > 0$.

A área de influência de cada perfil é a área do polígono de Voronoï correspondente (Figura 5.3). Estas áreas são processadas algebricamente, sendo os resultados aplicados na equação (6.1) para cada cota z .

Apresentam-se de seguida, para cada ensaio, as quantidades médias (em tempo e espaço) calculadas para caracterizar o escoamento. A coordenada vertical, z , está referenciada no plano médio das cristas do leito para os respectivos ensaios.

Estando perante um escoamento com fronteira fixa, devido à condição de não escorregamento, as velocidades junto ao leito devem ser nulas. Nos perfis de velocidade média longitudinal (Figura 6.1 a)) existe uma clara tendência dos valores se aproximarem de zero

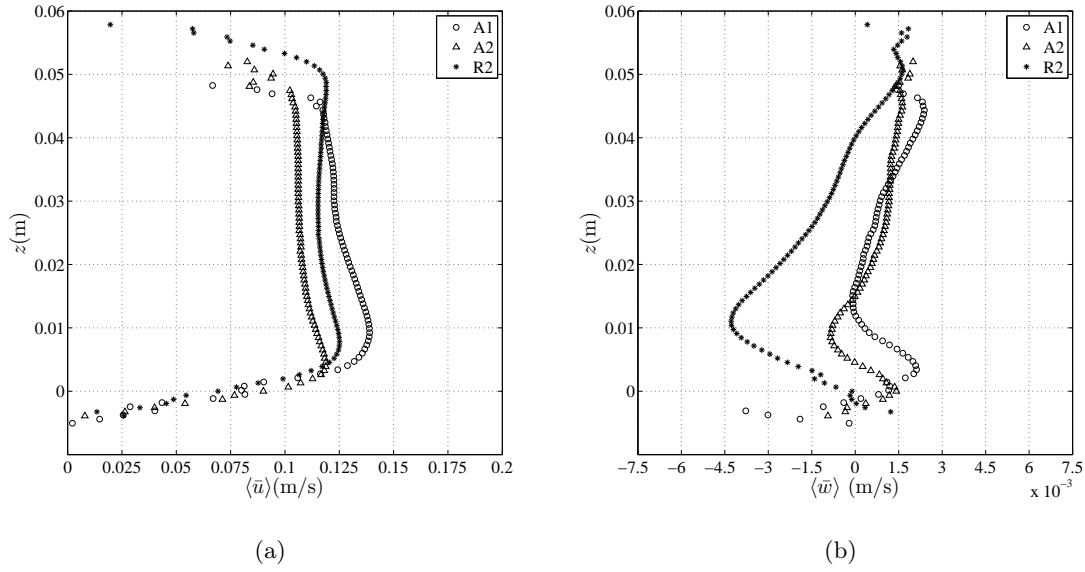


Figura 6.1: Velocidade média segundo as componentes: a) longitudinal e b) vertical.

junto ao leito. Após um pequeno aumento da velocidade acima do plano médio das cristas do leito ($z = 0$ m), observa-se que a influência das hastes ao longo da coluna de água é praticamente constante. Junto à superfície livre, os perfis de velocidades apresentam variações que se devem às oscilações da superfície livre verificadas durante os ensaios. Os perfis de velocidade longitudinal média parecem mostrar que esta variável diminui com o aumento da densidade de hastes, como também, com o aumento da intensidade das formas do fundo.

No caso do fundo com leito rugoso existe um movimento preferencialmente de cima para baixo, revelado pela velocidade média segundo a componente vertical (Figura 6.1 b)), que adquire valores negativos em grande parte da altura do escoamento. Observa-se que o aumento da densidade de hastes contribui para o aparecimento de movimentos descendentes. Contudo, deve-se ter em conta que a ordem de grandeza desta variável é pequena ($\times 10^{-3}$ m/s).

Na Figura 6.2 apresenta-se o gradiente vertical da velocidade longitudinal média correspondente a cada ensaio. Pode-se concluir que o gradiente vertical da velocidade longitudinal é muito semelhante para os três ensaios, pelo que não é sensível à densidade de hastes ou aos diferentes tipos de rugosidade do leito.

A Figura 6.3 apresenta os perfis das tensões normais de Reynolds para cada um dos três ensaios. Verifica-se que para o ensaio A2 estas tensões apresentam valores maiores, comparando com os restantes ensaios. A presença das hastes constitui uma fonte de turbulência, sendo que o ensaio com menor densidade de hastes assume os valores mais pequenos ao longo da coluna de água. Por outro lado o aumento da rugosidade da forma do fundo (leito de areia) parece actuar como um mecanismo que contribui para o aumento da turbulência para a mesma densidade de hastes.

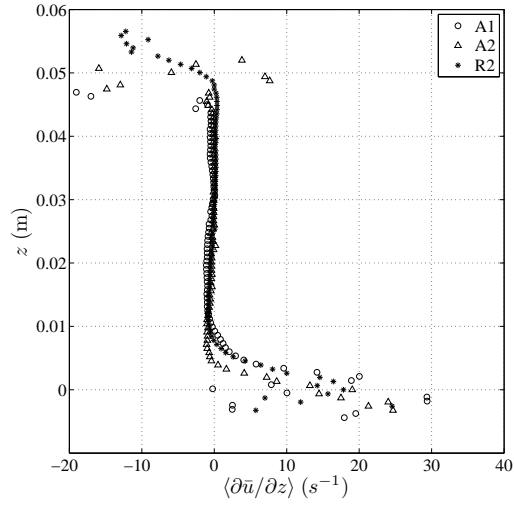


Figura 6.2: Gradiente vertical da velocidade longitudinal média.

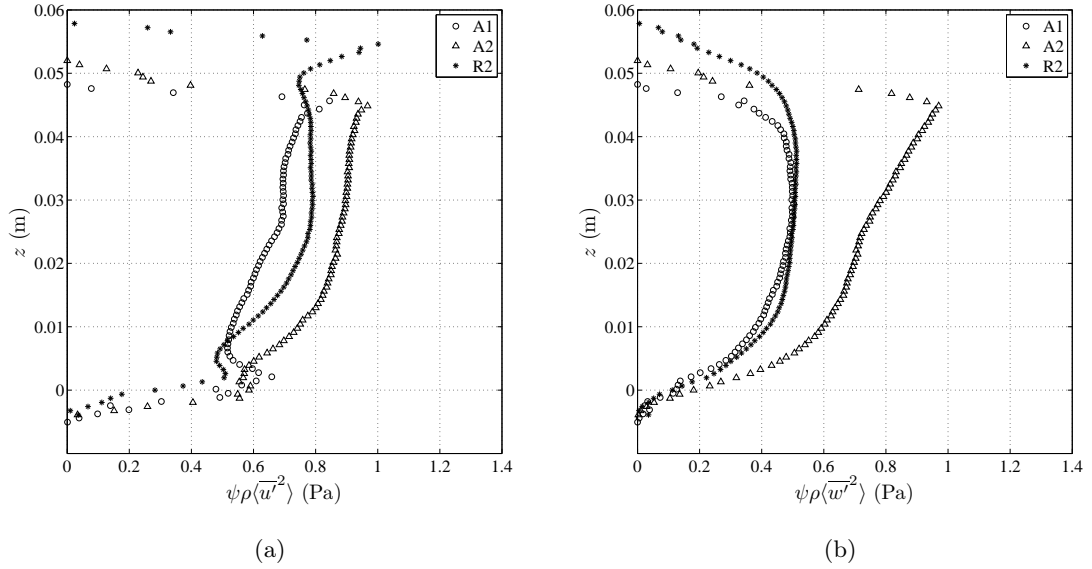


Figura 6.3: Tensão normal de Reynolds média segundo as componentes: a) longitudinal e b) vertical.

As tensões normais dispersivas na direcção longitudinal (Figura 6.4 a)) crescem com o aumento da densidade de hastes. Comparando os dois tipos de leito com a mesma densidade de hastes (ensaios A2 e R2), existem valores maiores para o leito de areia do que para o leito rugoso. Em todos os ensaios as tensões normais dispersivas na direcção longitudinal, atingem um valor máximo para a cota z correspondente ao plano médio das cristas do leito. Este facto é referido em vários estudos de escoamentos turbulentos sob leitos com fronteiras irregulares (Manes *et al.* 2007, Aberle *et al.* 2008 e Ferreira *et al.* 2010).

As tensões normais de Reynolds (Figura 6.3 a) e b)) segundo as direcções longitudinal e vertical (respectivamente) assumem a mesma ordem de grandeza que as tensões normais dispersivas na direcção longitudinal (Figura 6.4 a)), enquanto que na direcção vertical (Figura 6.4 b)) apresentam uma ordem de magnitude superior.

Na direcção vertical, as tensões normais dispersivas médias (Figura 6.4 b)) aumentam devido às oscilações do fundo, reduzem o seu valor ao longo da coluna de água com tendência a se anularem junto à superfície livre.

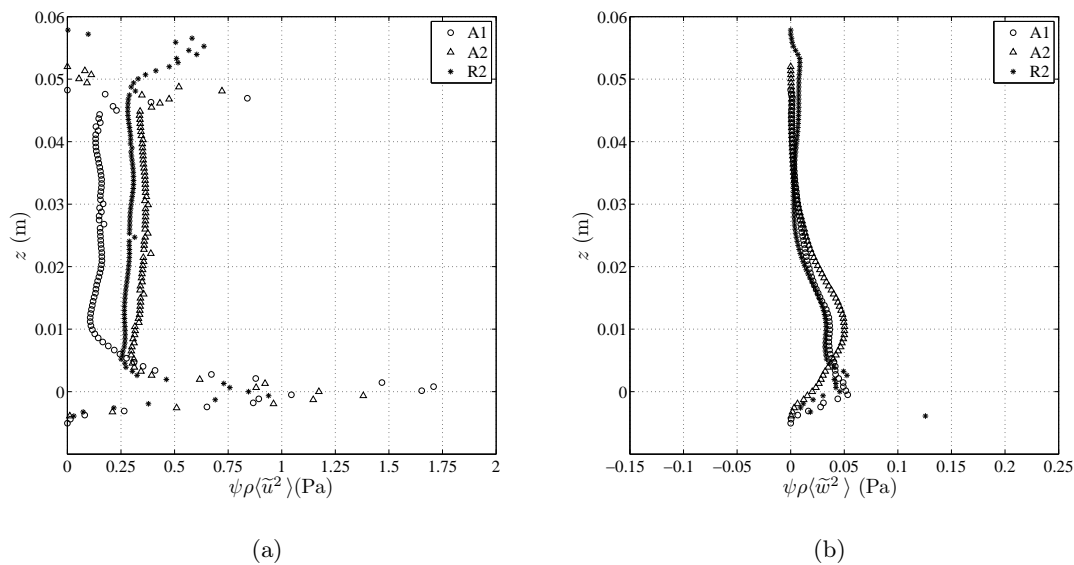


Figura 6.4: Tensão normal dispersiva média segundo as componentes: a) longitudinal e b) vertical.

A Figura 6.5 mostra a relação entre ambas as tensões normais segundo a direcção longitudinal. Comparando as tensões normais dispersivas com as de Reynolds nessa direcção, conclui-se que as primeiras não devem ser desprezadas, sendo tal facto mais evidente para uma maior densidade de hastes. Observa-se também que junto ao leito as tensões normais dispersivas são superiores às tensões normais de Reynolds.

Ao comparar as tensões tangenciais de Reynolds médias (Figura 6.6 a)) e dispersivas médias (Figura 6.6 b)) conclui-se que são da mesma ordem de grandeza. Portanto, as tensões tangenciais dispersivas médias também não devem ser desprezadas em escoamentos com leitos povoados por vegetação. Este facto é tanto mais evidente quanto maior a densidade de vegetação presente no escoamento.

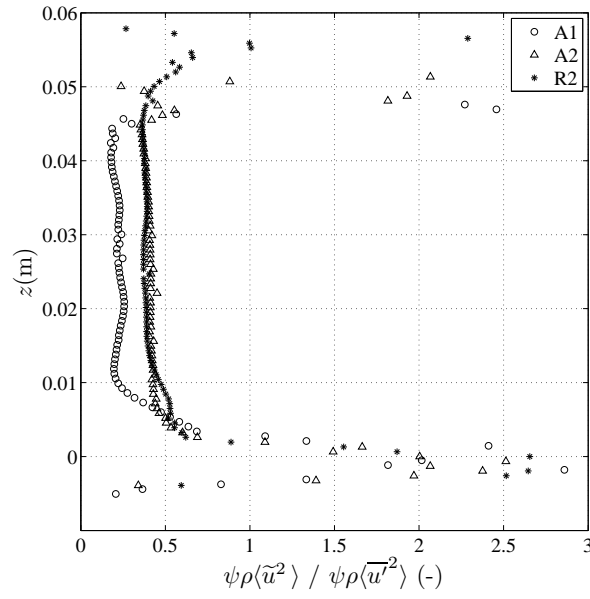


Figura 6.5: Relação entre as tensões normais dispersivas (Figura 6.4 a)) e normais de Reynolds (Figura 6.3 a)) na direcção longitudinal.

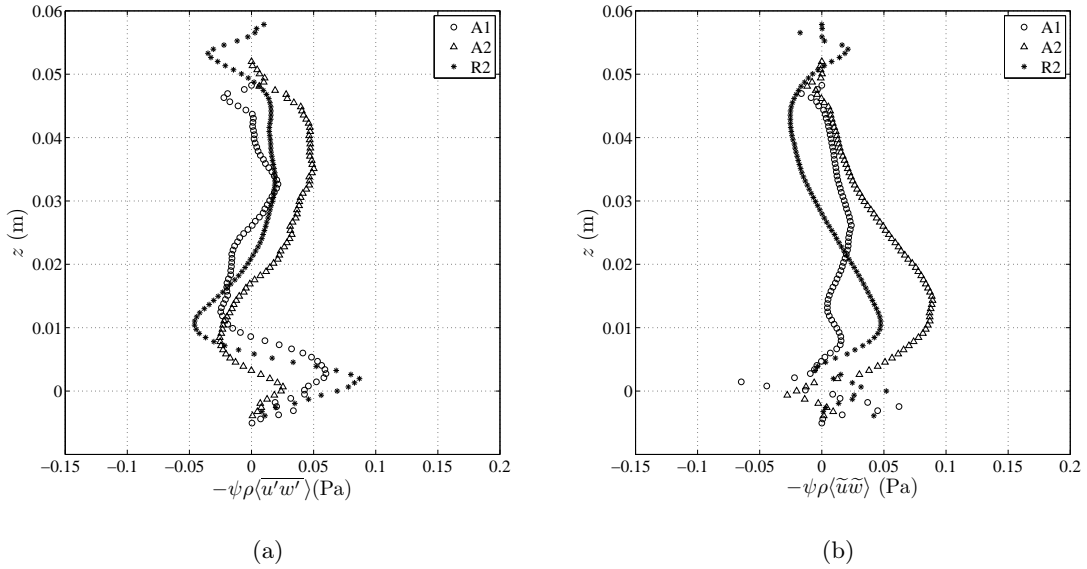


Figura 6.6: Tensão tangencial: a) de Reynolds média e b) dispersiva média.

Ao sobrepor as tensões tangenciais de Reynolds e as tensões tangenciais dispersivas (Figura 6.7), nota-se que os perfis apresentam formas aproximadamente simétricas, existindo tendências de crescimento contrárias entre as duas quantidades para a maior parte da altura de escoamento. Estando-se perante um escoamento heterogêneo, o valor das tensões tangenciais de Reynolds é compensado pelo valor das tensões tangenciais dispersivas e as tensões de resistência viscosas (desprezadas neste estudo) (Campbell 2005, pp.127-128 e Manes *et al.* 2007).

Analisando as tensões tangenciais junto ao leito, observa-se que o valor máximo das tensões tangenciais dispersivas ocorre aproximadamente à cota do plano médio das cristas do leito ($z = 0$ m), enquanto que as tensões tangenciais de Reynolds atingem um valor máximo a uma cota ligeiramente acima das anteriores.

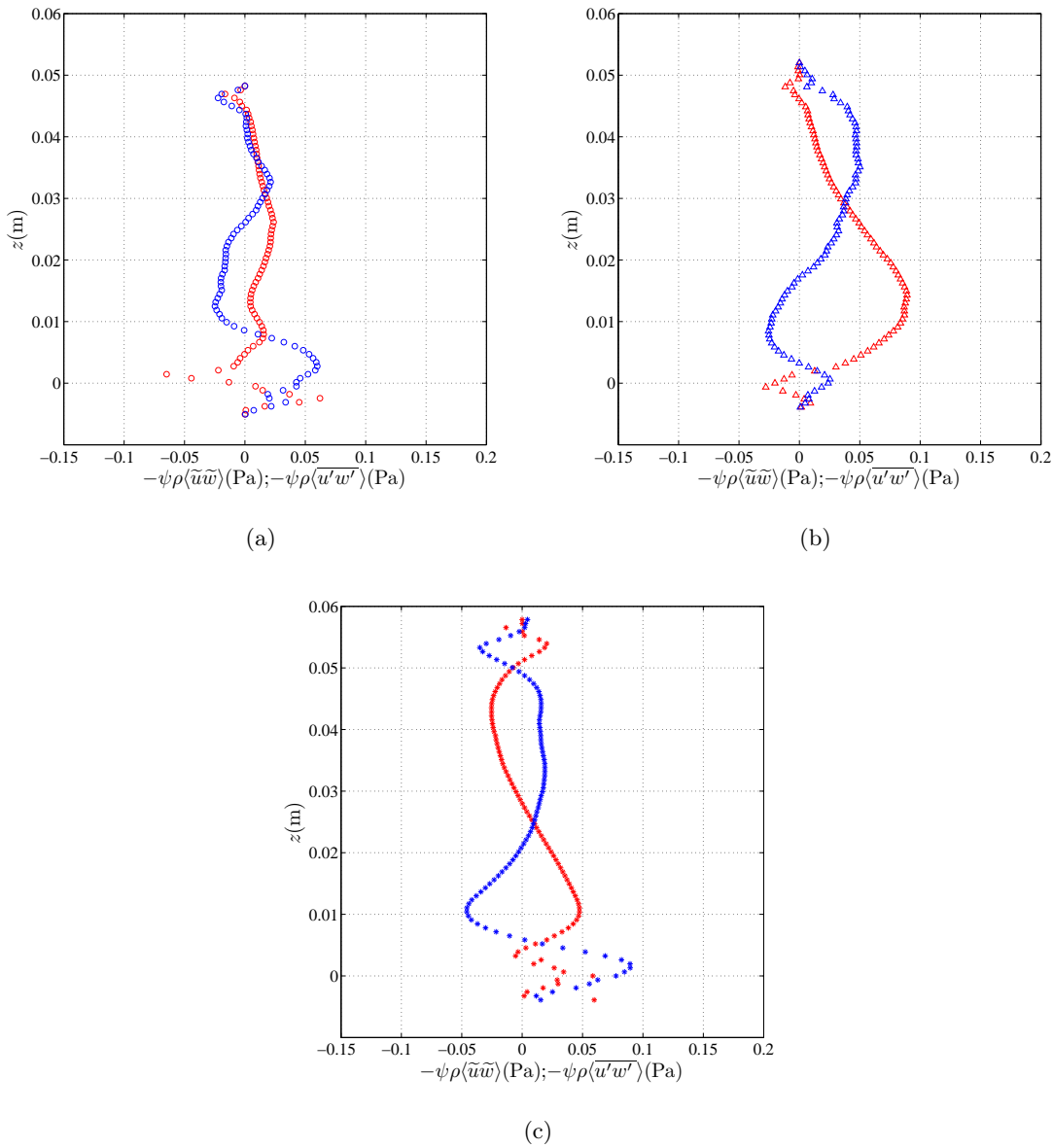


Figura 6.7: Sobreposição das tensões tangenciais dispersivas (a vermelho) e de Reynolds (a azul) para os ensaios: a) A1; b) A2 e c) R2.

Na Figura 6.8 está representada a diferença das tensões tangenciais dispersivas e de Reynolds presentes na Figura 6.7 para cada ensaio. O valor correspondente ao afastamento entre estas quantidades é maior para uma maior densidade de hastes, e faz-se sentir com maior intensidade numa zona da altura de escoamento acima do leito, onde as tensões tangenciais dispersivas são maiores que as de Reynolds (ver Figura 6.7). Esta zona é identificada na Figura 6.8 com valores positivos acima de $z = 0$ m. A zona identificada com valores negativos (Figura 6.8) traduz valores de tensão tangencial de Reynolds maiores em comparação com as dispersivas (Figura 6.7).

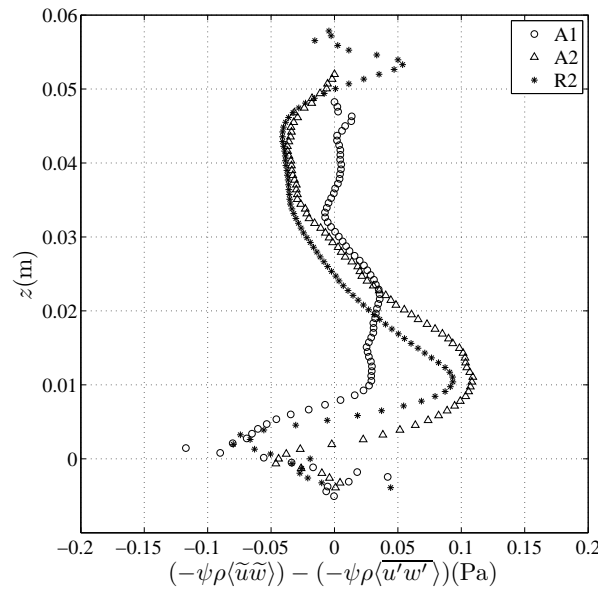
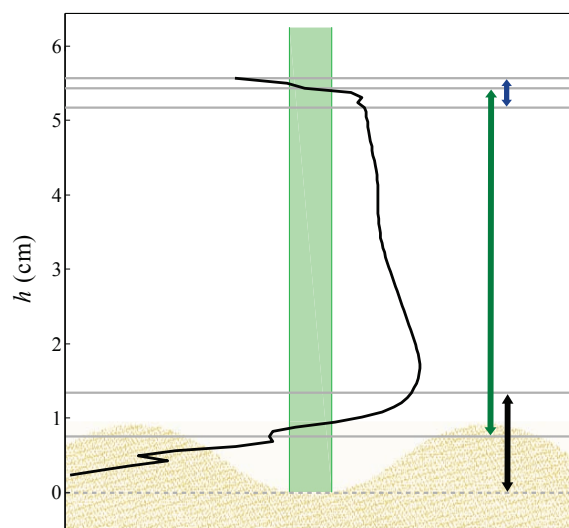


Figura 6.8: Perfil da diferença das tensões tangenciais dispersivas e de Reynolds para cada ensaio.

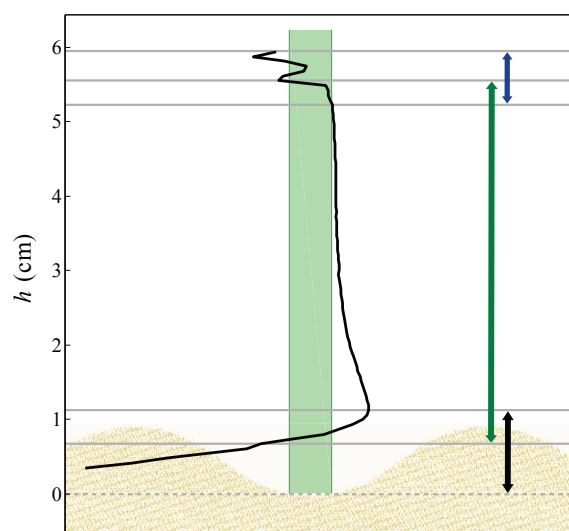
6.2 Alturas de influência

A Figura 6.9 identifica a altura da coluna de água onde o escoamento é influenciado pelo leito, hastes e superfície livre para os três ensaios. A cota zero corresponde ao plano das cavas das oscilações do leito e é representado pela linha a tracejado. As setas a preto, verde e azul representam a altura de escoamento onde se faz sentir a influência do leito, hastes e superfície livre respectivamente. A altura total de influência das hastes corresponde à altura anteriormente definida por H (Tabela 4.5). Este valor foi estimado a partir da tensão normal dispersiva média longitudinal para cada ensaio.

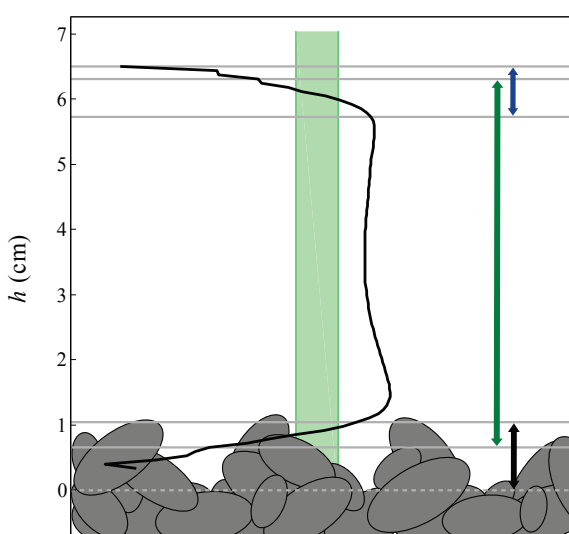
Vários autores recorrem a esta quantidade para determinar o topo da camada influenciada pela rugosidade do fundo em escoamentos sobre fronteiras rugosas por esta apresentar valores mais sensíveis a perturbações ao escoamento (Aberle 2006 e Aberle *et al.* 2008). Na Figura 6.10, apresenta-se um perfil de tensão normal dispersiva média longitudinal. Os círculos a cheio de cor verde marcam os valores máximos junto ao leito e superfície livre, representativos do início e final da altura de escoamento controlada por hastes, H .



(a)



(b)



(c)

Figura 6.9: Esquema da distribuição de influência do leito, hastes e superfície livre para os ensaios: a) A1; b) A2 e c) R2, com o respectivo perfil de velocidade longitudinal.

O limite da altura de influência do leito (círculo a cheio de cor preto) e da superfície livre (círculo a cheio de cor azul) é determinado pela variação de curvatura que se faz sentir imediatamente abaixo e acima (respectivamente) da zona central do escoamento onde se nota um perfil vertical.

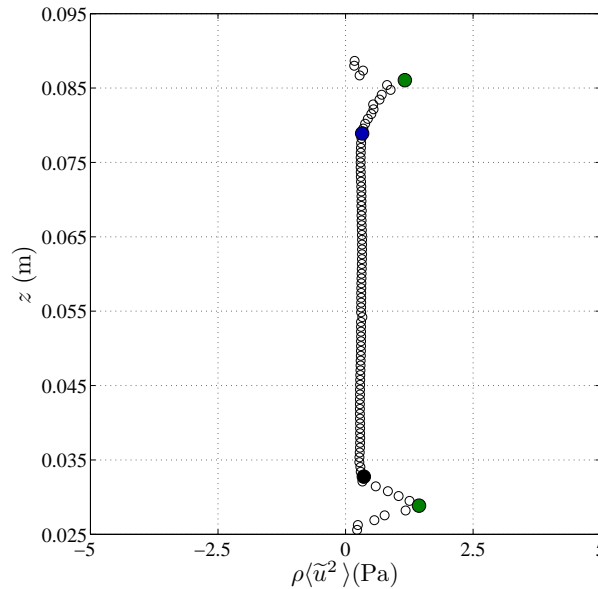


Figura 6.10: Perfil de média dupla espaço-temporal da tensão normal dispersiva na direcção longitudinal (ensaio R2).

Existem zonas onde a influência simultânea do leito ou da superfície livre com as hastes não pode ser desprezada, coincidindo na mesma altura de escoamento como mostra a Figura 6.9. Como também se encontram zonas onde a influência do leito e superfície livre se fazem sentir principalmente de forma isolada.

Na Figura 6.11, mostra-se um gráfico de barras que permite analisar as percentagens referentes à distribuição das várias alturas totais de influência para cada ensaio. Na Figura 6.12, podem-se observar as percentagens do leito (Figura 6.12 i) e superfície livre (Figura 6.12 ii) que são simultaneamente influenciadas pela presença das hastes, como também a percentagem de altura de influência das hastes que actua de forma isolada (Figura 6.12 iii). Para tal, foram tidas em conta as alturas de escoamento para cada ensaio (Tabela 4.4) e as alturas de influência indicadas na Figura 6.9.

A Figura 6.11 mostra que nos escoamentos por entre zonas povoadas com vegetação o escoamento é principalmente controlado pelos elementos de vegetação. Em todos os ensaios verificou-se que cerca de 90 % da altura do escoamento é controlada pelas hastes. E desta cerca de 83 % é feita sentir principalmente de forma isolada (Figura 6.12 iii).

A influência do leito faz-se sentir sobre uma maior altura de escoamento para o caso com leito de areia e menor densidade de hastes (27 % para o ensaio A1). A diminuição da influencia do leito no escoamento acontece para um aumento da densidade de hastes

(21 % para o ensaio A2) e ainda para uma diminuição das formas do fundo (18 % para o ensaio R2) (Figura 6.11). As alturas de influência conjunta do leito e hastes acompanham esta tendência (Figura 6.12 i).

A influência da superfície livre no escoamento é idêntica para os ensaios A2 e R2 (13 %) e menor para o ensaio A1 (8 %). Pelo que se conclui que a influência da superfície livre depende principalmente da densidade de hastes, sendo maior para uma maior densidade de hastes. Observa-se que a influência das hastes na superfície livre é maior no caso dos ensaios R2 e A1 comparando com o ensaio A2 (Figura 6.12 ii). Apenas cerca de 44 % da altura de escoamento influenciada pela superfície livre é simultaneamente pela presença das hastes no ensaio A2, sendo a altura de escoamento controlada somente pela superfície livre maior em relação aos restantes ensaios.

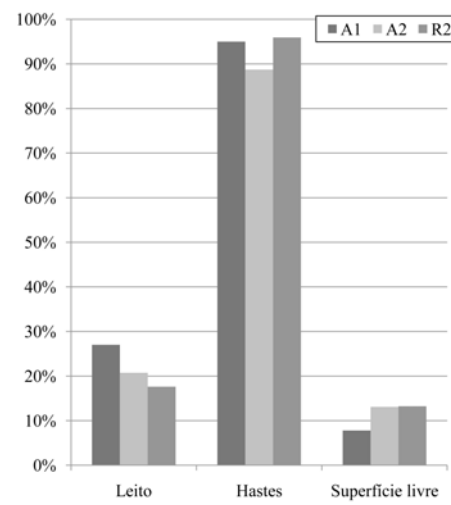


Figura 6.11: Percentagens das alturas de escoamento para cada um dos ensaios influenciadas pelo leito, hastes e superfície livre.

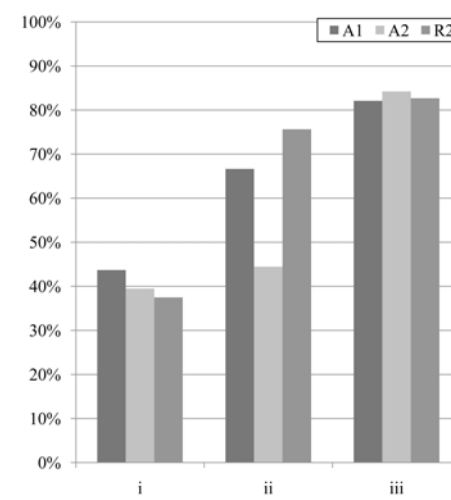


Figura 6.12: Percentagem da altura de influência: i) do leito que também é influenciada pelas hastes; ii) da superfície livre que também é influenciada pelas hastes e iii) das hastes apenas influenciada por hastes.

6.3 Normalização de perfis

6.3.1 Considerações gerais

Feita a análise de como o escoamento é influenciado ao longo da sua coluna de água, procurou-se encontrar uma escala característica que normalize as quantidades turbulentas e dispersivas por forma a obter perfis universais.

No presente sub-capítulo é feita uma comparação das quantidades turbulentas e dispersivas adimensionalizadas por diferentes escalas. As cotas z são adimensionalizadas pela altura de coluna de água controlada apenas pelas hastes, H (Tabela 4.5).

Pretende-se encontrar uma escala que normalize as quantidades turbulentas e dispersivas de forma universal, em analogia com os escoamentos bidimensionais-verticais que desenvolvem camada limite turbulenta. Nesses escoamentos a escala de velocidades relevante é a velocidade de atrito, forma cinemática de expressar a tensão de arrastamento junto ao fundo (Nezu & Nakagawa 1993, pp.48-49). Nos escoamentos em zonas com vegetação emersa, a importância relativa da tensão de arrastamento junto ao fundo é baixa face à magnitude do arrastamento sobre as hastes (Ricardo 2008, p.95), pelo que a escala cinemática relevante não será a velocidade de atrito.

Assim, para este caso de estudo, propõe-se adimensionalizar as quantidades turbulentas e dispersivas por três escalas diferentes:

- U , correspondente à velocidade longitudinal média da coluna de água H ;
- $\sqrt{g_x H}$, é a escala gravítica associada ao declive total da superfície livre, dh/dx (apresentado na Tabela 4.4), onde $g_x = g \times dh/dx$;
- C , representa a escala para a qual se obtém a normalização dos perfis das grandezas turbulentas e dispersivas que definem o escoamento.

O factor de adimensionalização C foi obtido confrontando o perfil de cada quantidade turbulenta e dispersiva independentemente. Procuraram-se esses valores forçando a sobreposição dos perfis do ensaio A2 com o ensaio R2, e posteriormente destes com o ensaio A1.

Na Tabela 6.1 mostram-se os valores dos factores de adimensionalização utilizados para cada ensaio.

Tabela 6.1: Factores de adimensionalização.

	A1	A2	R2
U (m/s)	0.1243	0.1076	0.1152
$\sqrt{g_x H}$ (m/s)	0.0347	0.0477	0.0440
$C(\langle \overline{u'^2} \rangle)$ (Pa)	1.00	1.30	1.15
$C(\langle \overline{w'^2} \rangle)$ (Pa)	1.00	1.45	1.05
$C(\langle \tilde{u}^2 \rangle)$ (Pa)	1.00	2.25	1.95
$C(\langle \tilde{w}^2 \rangle)$ (Pa)	1.00	1.45	0.75
$C(\langle \overline{u'w'} \rangle)$ (Pa)	1.00	2.20	1.20
$C(\langle \tilde{u}\tilde{w} \rangle)$ (Pa)	1.00	11.00	6.00

6.3.2 Factor de adimensionalização U

Uma vez que num escoamento povoado por vegetação emersa e rígida a magnitude da tensão de arrastamento sobre as hastes é condicionante em relação à tensão de arrastamento junto ao fundo, optou-se por adimensionalizar os perfis de média dupla espaço-temporal pelo valor da velocidade média temporal ao longo da coluna de água controlada por hastes (Tabela 6.1).

Apesar das variáveis do escoamento apresentarem, de um modo geral, perfis com forma semelhante, observa-se que esta escala não normaliza os perfis de tensões de Reynolds ou dispersivas para qualquer ensaio.

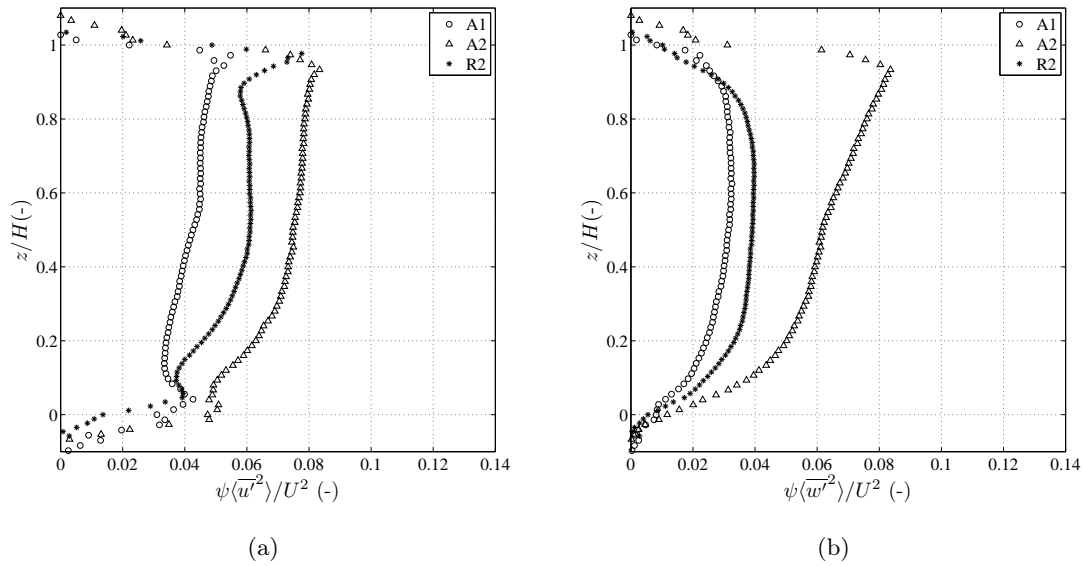


Figura 6.13: Tensão normal de Reynolds média segundo as componentes: a) longitudinal e b) vertical.

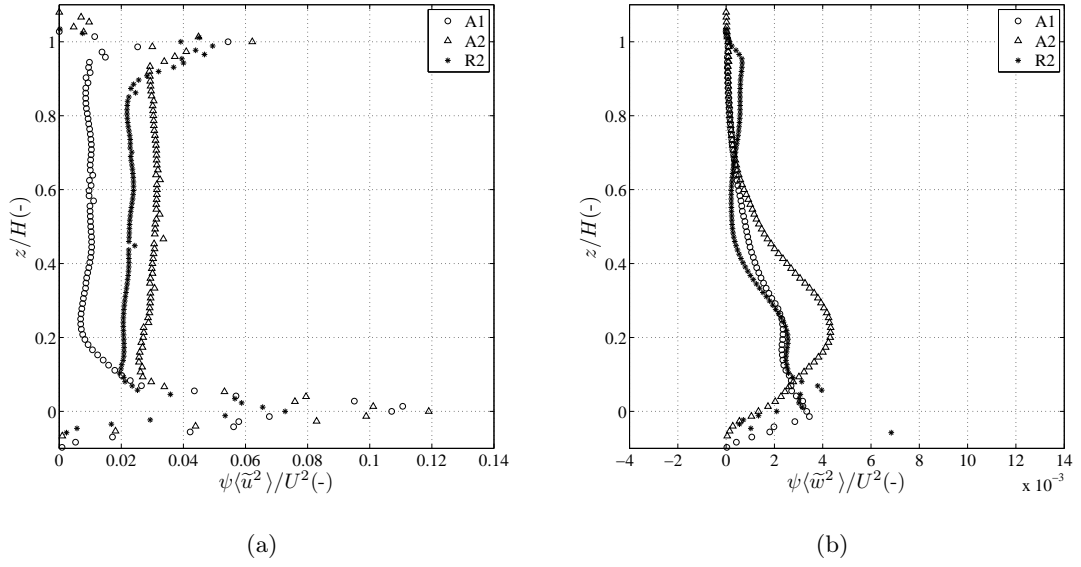


Figura 6.14: Tensão normal dispersiva média segundo as componentes: a) longitudinal e b) vertical.

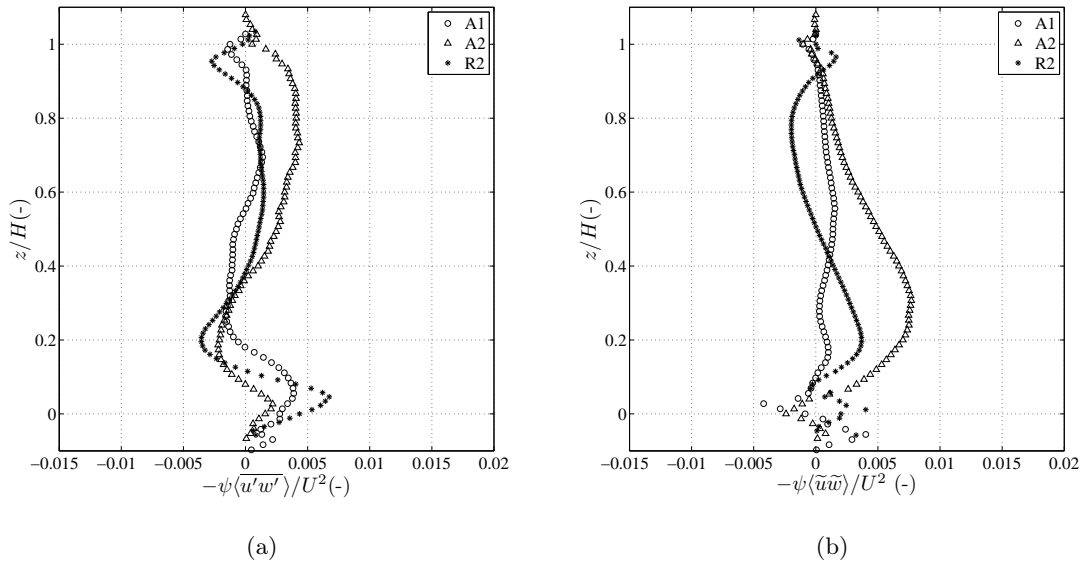


Figura 6.15: Tensão tangencial: a) de Reynolds média e b) dispersiva média.

6.3.3 Factor de adimensionalização $\sqrt{g_x H}$

Ao adoptar uma escala gravítica ($\sqrt{g_x H}$) para a adimensionalização dos perfis de média dupla espaço-temporal, obteve-se em geral uma maior aproximação dos perfis de todas as tensões turbulentas e dispersivas, em relação à adimensionalização pela velocidade média, U . Para a mesma densidade de hastes (ensaios A2 e R2) esta escala gravítica conduz à normalização dos perfis de tensões normais de Reynolds e dispersivas na direcção longitudinal e dispersivas na direcção vertical (Figuras 6.16 a), 6.17 a)) e do perfil de tensão tangencial de Reynolds (Figura 6.18 a)).

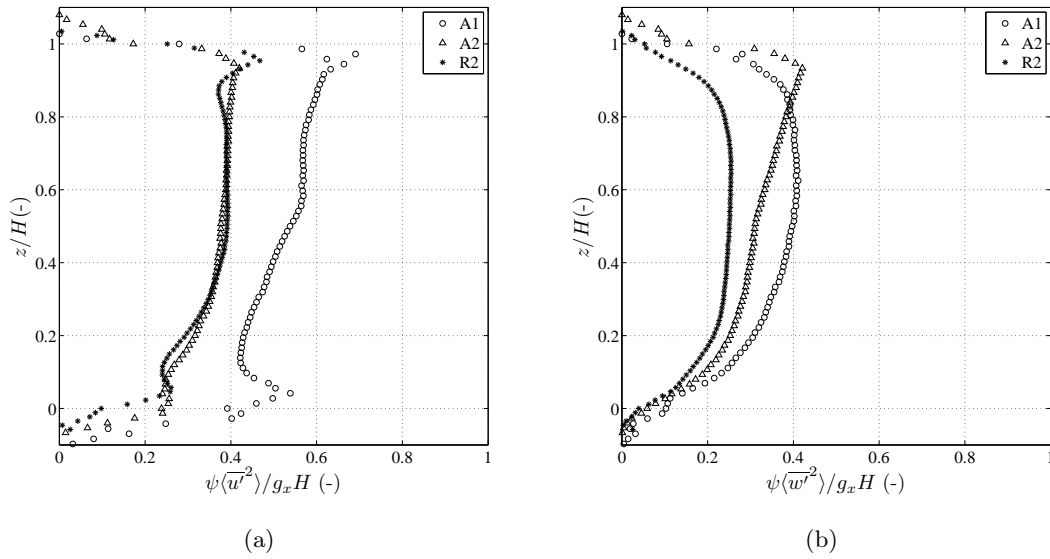


Figura 6.16: Tensão normal de Reynolds média segundo as componentes: a) longitudinal e b) vertical.

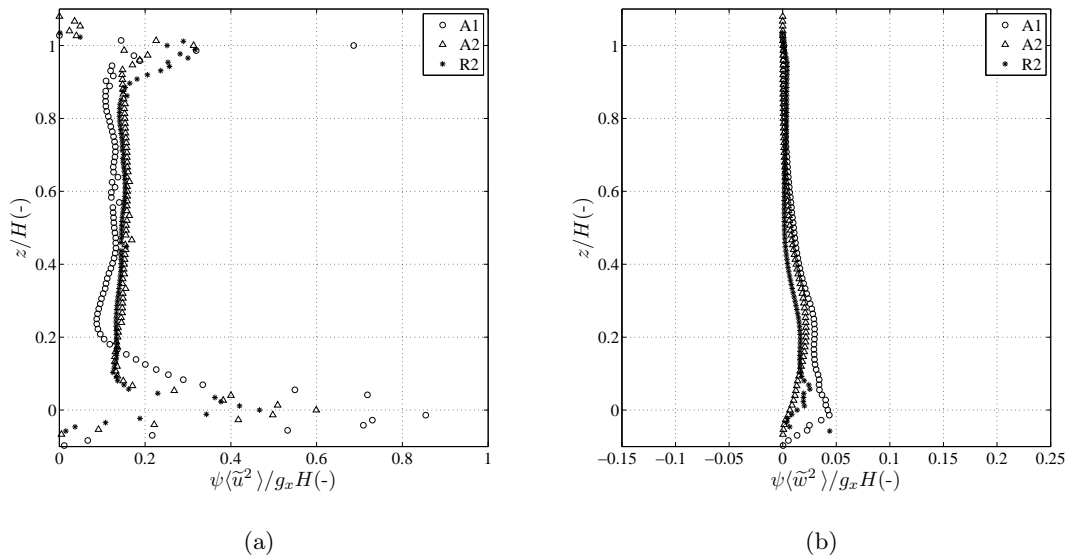


Figura 6.17: Tensão normal dispersiva média segundo as componentes: a) longitudinal e b) vertical.

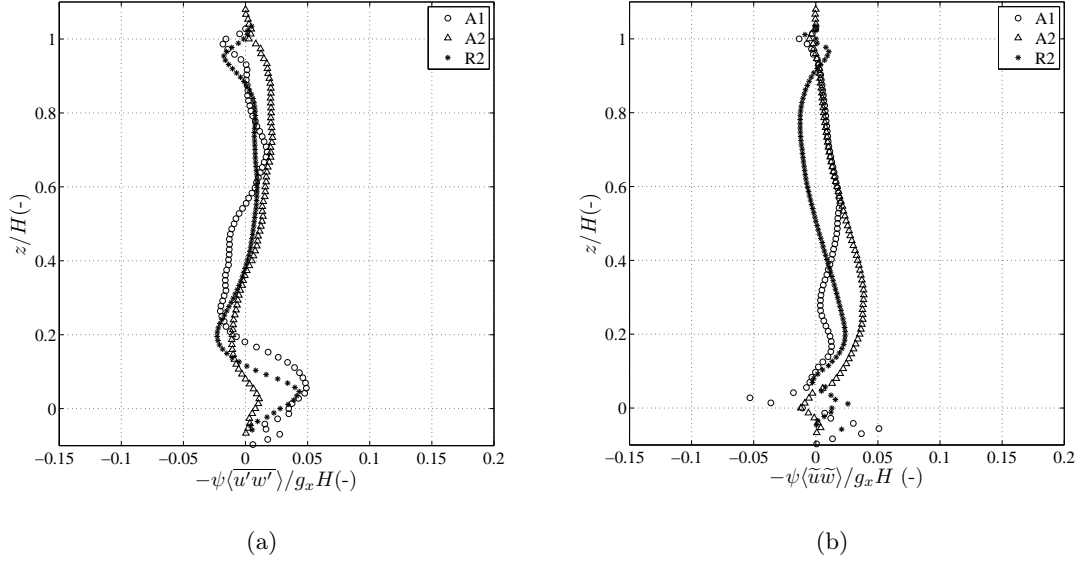


Figura 6.18: Tensão tangencial: a) de Reynolds média e b) dispersiva média.

6.3.4 Factor de adimensionalização C

Dado que as escalas apresentadas anteriormente não universalizam todos os perfis de tensões turbulentas e dispersivas para os três ensaios, procurou-se uma escala que conduzisse a essa universalização confrontando cada perfil independentemente. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 6.1. Conclui-se que não existe um valor único que universalize os perfis de tensões turbulentas e dispersivas.

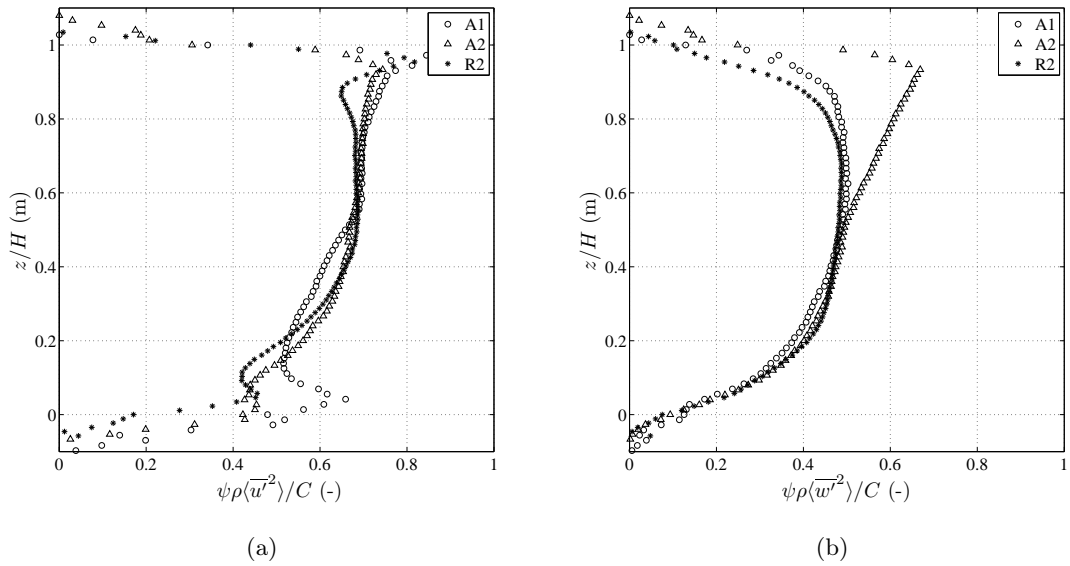


Figura 6.19: Tensão normal de Reynolds média segundo as componentes: a) longitudinal e b) vertical.

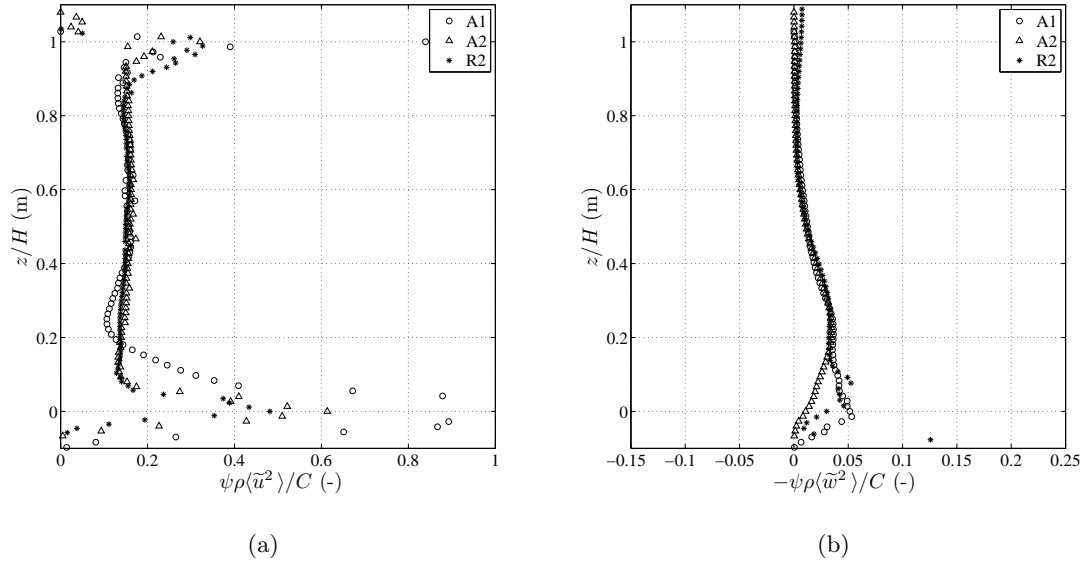


Figura 6.20: Tensão normal dispersiva média segundo as componentes: a) longitudinal e b) vertical.

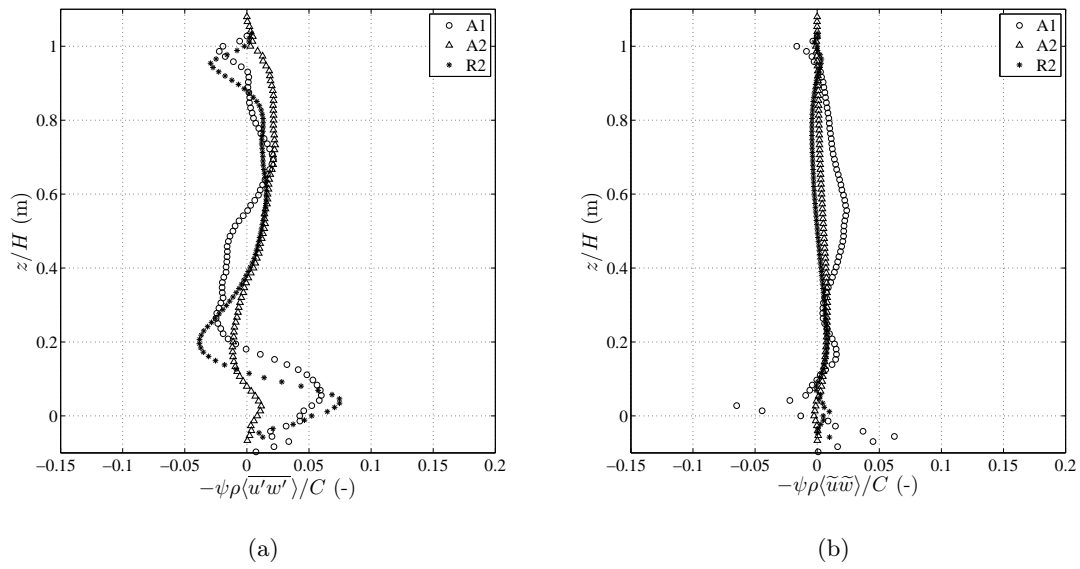


Figura 6.21: Tensão tangencial: a) de Reynolds média e b) dispersiva média.

6.3.5 Discussão de Resultados

Analisando os perfis de quantidades turbulentas e dispersivas adimensionalizados para as três escalas diferentes, conclui-se que nenhuma destas escalas corresponde a uma escala única que permita a obtenção de perfis universais. Observa-se que os valores independentes de escala, aplicada como escala de colapso, C , universalizam todos os perfis com valores diferentes para cada grandeza. No entanto, a escala gravítica, $\sqrt{g_x H}$, universaliza os perfis de tensões normais de Reynolds e dispersivas na direcção longitudinal (Figuras 6.16 a), 6.17 a)) e os de tensão tangencial de Reynolds (Figura 6.17 a)) para os ensaios com a mesma densidade de hastes. De um modo geral, a componente g_x da escala gravítica expressa a quantidade de energia dissipada no escoamento, na medida em que é influenciada pelo gradiente da superfície livre, dh/dx . Todas as componentes dos tensores das tensões (de Reynolds e dispersivas) contribuem com trabalho para gerar energia cinética e portanto dissipação de energia do escoamento médio. Assim, para a mesma densidade de hastes, compreende-se que a escala gravítica permita normalizar quase todos os perfis de segundos momentos do escoamento médio espaço-temporal. Conclui-se que a densidade de hastes e o gradiente longitudinal da altura do escoamento são factores a ter em conta na busca da escala que normaliza os perfis de tensões de Reynolds e dispersivas.

Capítulo 7

Conclusões e trabalho futuro

Nesta dissertação pretendeu-se caracterizar detalhadamente, à escala do espaço inter-hastes, o escoamento em zonas povoadas com vegetação emersa e rígida. O trabalho laboratorial consistiu fundamentalmente em medir campos de velocidade instantânea em diversas posições no espaço inter-hastes para três ensaios distintos, através de uma técnica pouco intrusiva, o *Particle Image Velocimetry*. Mediram-se ainda, parâmetros macroscópicos do escoamento como a topografia do fundo, a altura do escoamento e o gradiente da superfície livre. Os campos de velocidade instantânea foram transformados em campos de velocidade média temporal e demais grandezas turbulentas médias, como tensões de Reynolds.

Concluiu-se que o escoamento no espaço inter-hastes apresenta grande heterogeneidade em toda a coluna de água, identificada pela variabilidade de valores apresentados nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6, sendo que o maior afastamento de hastes conduz:

- i) A uma maior estratificação do escoamento;
- ii) A uma maior heterogeneidade espacial do escoamento.

Utilizou-se a totalidade dos perfis médios temporais, de cada ensaio, para a aplicação da metodologia DAM, com a qual se quantificaram os perfis das grandezas médias (no espaço e no tempo) intervenientes nas equações de conservação da quantidade de movimento e da massa, concluindo os seguintes aspectos:

- O aumento de densidade de hastes e do comprimento de onda das formas do fundo, contribuem para o aumento das tensões turbulentas e dispersivas (Figuras 6.3, 6.4 e 6.6);
- As tensões dispersivas não são, em geral, desprezáveis face às tensões de Reynolds. Este facto acentua-se com o aumento da densidade de hastes (Figuras 6.5 e 6.8).

Com base nos resultados obtidos, analisou-se como se comporta o escoamento, nomeadamente, quanto à distribuição das alturas de influência relativas para cada ensaio (Figuras

6.9, 6.11 e 6.12). Chegou-se às seguintes conclusões:

- Em zonas povoadas com vegetação o escoamento é principalmente controlado pelos elementos de vegetação;
- A influência do leito faz-se sentir sobre uma maior altura de escoamento para o caso com menor densidade de hastes e maior rugosidade de formas do leito (leito de areia);
- A influência da superfície livre depende principalmente da densidade de hastes, sendo maior para uma maior densidade de hastes.

Pretendeu-se também, identificar as escalas características que normalizam as variáveis intervenientes na equação de conservação da quantidade de movimento para o escoamento em estudo. Especificam-se as conclusões nos seguintes pontos:

- A densidade de hastes e o gradiente longitudinal da altura do escoamento são factores a ter em conta na busca da escala que normaliza os perfis de segundos momentos do escoamento médio espaço-temporal;
- Não foi encontrada uma escala única que normalize todas as quantidades turbulentas e dispersivas por forma a obter perfis universais.

Devem ser elaborados estudos complementares para dar continuidade e acréscimo de conhecimento sobre esta temática. Assim sendo, na linha do presente estudo seria recomendável ter em conta os aspectos a seguir descritos.

Dada a grande heterogeneidade espacial do tipo de escoamento em estudo, seria prudente numa primeira análise fazer a caracterização em planta da zona de medição. Isto permite não só visualizar em planta onde existem mais flutuações de velocidade, como também escolher de acordo com os objectivos em causa, o número e localização das posições de medição. A escolha das posições de medição sem o conhecimento prévio do comportamento em termos espacial do escoamento pode levar a resultados que não traduzem a verdadeira natureza do escoamento.

A presença de vegetação em cursos de água, apresenta uma natureza complexa pelo que se deve complementar o estudo deste tipo de escoamento com diferentes características de vegetação, utilizando hastes flexíveis ou com diferentes diâmetros e também com um carácter aleatório de distribuição da densidade de caules, impondo uma alternância da densidade de hastes.

O escoamento deve ser analisado ao longo do escoamento em várias secções e não apenas em uma secção por ensaio. Assim, pode-se comparar a evolução dos efeitos impostos pela vegetação, leito ou outra variável ao escoamento de montante para jusante em cada ensaio.

Os resultados presentes neste trabalho podem ser utilizados para posterior investigação laboratorial ou estudos de modelação numérica em escoamentos turbulentos povoados por vegetação emersa e rígida, ou mais directamente em práticas de engenharia. A metodologia

seguida para descrever e caracterizar os ensaios laboratoriais pode ser utilizada em futuros trabalhos laboratoriais.

Bibliografia

- ABERLE, J. (2006). Spatially averaged near-bed flow field over rough armor layers. In: *River Flow 2006* (R. M. L. FERREIRA, J. G. A. B. L., E. C. L. ALVES & CARDOSO, A. H., eds.). Taylor and Francis.
- ABERLE, J., KOLL, K. & DITTRICH, A. (2008). Form induced stresses over rough gravel-beds. *Acta Geophysica* **56**(3), 584–600.
- BREDERODE, V. (1997). *Fundamentos de aerodinâmica incompressível*. Instituto Superior Técnico, Lisboa: Edição do Autor.
- CAMPBELL, L. J. (2005). *Double-Averaged open-channel flow over regular rough beds*. Ph.D. thesis, University of Aberdeen, Aberdeen.
- CAROLLO, F. G., FERRO, V. & TERMINI, D. (2005). Flow resistance law in channels with flexible submerged vegetation. *Journal of Hydraulic Engineering* **131**(7), 554–564.
- FERREIRA, R. L., FERREIRA, L. M., RICARDO, A. M. & FRANCA, M. J. (2010). Impacts of sand transport on flow variables and dissolved oxygen in gravel-bed streams suitable salmonid spawning. *River Research and Applications* **26**(10), 414–438.
- FERREIRA, R. M. L. (2011). Turbulent flow hydrodynamics and sediment transport. laboratory research with lda and piv. In: *Experimental methods and techniques in hydraulic research* ((IN PRESS), P. R. E., ed.).
- FERREIRA, R. M. L., FRANCA, M. J. & LEAL, J. G. A. B. (2008). Flow resistance in open-channel flows with mobile hydraulically rough beds. In: *River Flow 2008 - Vol. 1*.
- FINNIGAN, J. (2000). Turbulence in plant canopies. *Annu. Rev. Fluid Mech.* **32**, 519–571.
- FINNIGAN, J. J. & SHAW, R. H. (2008). Double-averaging methodology and its application to turbulent flow in and above vegetation canopies. *Acta Geophysica* **56**(3), 534–561.
- GHISALBERTI, M. & NEPF, H. M. (2004). The limited growth of vegetated shear layers. *Water Resources Research* **40**(W07502).
- GIMENEZ-CURTO, L. A. & CORNIERO LERA, M. A. (1996). Oscillating turbulent flow over very rough surfaces. *J. Geophys. Res.* **101**(C9), 20745 – 20758.

- GRAY, W. G. & LEE, P. C. Y. (1977). On the theorems for local volume averaging of multiphase systems. *International Journal of Multiphase Flow* **3**, 333–340.
- HJEMFELT, A. T. & MOCKROS, L. F. (1996). Motion of discrete particles in a turbulent fluid. *Applied Science Research* **16**, 149–161.
- JAMES, C. S., BIRKHEAD, A. L., JORDANOVA, A. A. & O’SULLIVAN, J. J. (2004). Flow resistance of emergent vegetation. *Journal of Hydraulic Research* **42**(4), 390–398.
- JÄRVELÄ, J. (2002). Flow resistance of flexible and stiff vegetation: a flume study with natural plants. *Journal of Hydrology* **269**, 44–54.
- KADLEC, R. H. (1990). Overland flow in wetlands: Vegetation resistance. *Journal of Hydraulic Engineering* **116**(5), 691–705.
- LOPEZ, F. & GARCÍA, M. (1998). Open-channel flow through simulated vegetation: Suspended sediment transport modeling. *Water Resources Research* **34**(9), 2341–2352.
- MANES, C., POKRAJAC, D. & MCEWAN, I. (2007). Double-averaged open-channel flows with small relative submergence. *Journal of Hydraulic Engineering* **133**(8), 896–904.
- MELLING, A. (1997). Tracer particles and seeding for particle image velocimetry. *Measurement Science and Technology* **8**, 1406–1416.
- NEPF, H. (1999). Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation. *Water Resources Research* **35**(2), 479–489.
- NEPF, H. M. & VIVONI, E. R. (1999). Turbulence structure in depth-limited, vegetated flow : transition between emergent and submerged regimes. In: *Conference Proceedings of the 28th International IARRH Conference*. Graz, Austria.
- NEZU, I. & NAKAGAWA, H. (1993). *Turbulence in Open-Channel Flows*, vol. Monograph Series. Balkema, Rotterdam: International Association for Hydraulic Research.
- NIKORA, V. (2008). Hydrodynamics of rough-bed turbulent flows: spatial averaging perspective. In: *River Flow 2008 - Vol. 1*.
- NIKORA, V., GORING, D., MCEWAN, I. & GRIFFITHS, G. (2001). Spatially averaged open-channel flow over rough bed. *Journal of Hydraulic Engineering* **127**(2), 123–133.
- NIKORA, V., KOLL, K., MCEWAN, I., MCLEAN, S. & DITTRICH, A. (2004). Velocity distribution in the roughness layer of rough-bed flows. *Journal of Hydraulic Engineering* **130**(10), 1036–1042.
- NIKORA, V., LARNED, S., NIKORA, N., DEBNATH, K., COOPER, G. & REID, M. (2008). Hydraulic resistance due to aquatic vegetation in small streams: Field study. *Journal of Hydraulic Engineering* **134**(9), 1326–1332.

- NIKORA, V., MCEWAN, I., MCLEAN, S., COLEMAN, S., POKRAJAC, D. & WALTERS, R. (2007a). Double-averaging concepts for rough-bed open-channel and overland flows: Theoretical background. *Journal of Hydraulic Engineering* **133**(8), 873–883.
- NIKORA, V., MCLEAN, S., COLEMAN, S., POKRAJAC, D., MCEWAN, I., CAMPBELL, L., ABERLE, J., CLUNIE, D. & KOLL, K. (2007b). Double-averaging concepts for rough-bed open-channel and overland flows: Applications. *Journal of Hydraulic Engineering* **133**(8), 884–895.
- NOGUEIRA, H. (2007). *Pilares de pontes em leitos móveis*. Master’s thesis, Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- OKABE, A., BOOTS, B., SUGIHARA, K. & CHIU, S. (2000). *Spatial Tessellations - Concepts and Applications of Voronoi Diagrams*. John Wiley, 2nd ed.
- POGGI, D. & KATUL, G. G. (2008). Micro- and macro-dispersive fluxes in canopy flows. *Acta Geophysica* **56**(3), 778–800.
- POKRAJAC, D., MCEWAN, I. & NIKORA, V. (2008). Spatially averaged turbulent stress and its partitioning. *Exp Fluids* **45**, 73–83.
- POPE, S. B. (2000). *Turbulent Flows*. Cambridge University Press.
- RAFFEL, M., WILLERT, C. E. & KOMPENHANS, J. (1998). *Particle Image Velocimetry: A Pratical Guide*. Germany: Springer.
- RAUPACH, M. R. (1992). Drag and drag partition on rough surfaces. *Boundary-Layer Meteorology* **60**, 375–395.
- RAUPACH, M. R., COPPIN, P. A. & LEGG, B. J. (1986). Experiments on scalar dispersion within a model plant canopy - part i: turbulence structure. *Boundary Layer Meteorology* **35**, 21–52.
- RAUPACH, M. R., FINNIGAN, J. J. & BRUNET, Y. (1996). Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: the mixing-layer analogy. *Boundary-Layer Meteorology* **78**, 351–382.
- RAUPACH, M. R. & SHAW, R. H. (1982). Averaging procedures for flow within vegetation canopies. *Boundary-Layer Meteorology* **22**, 79–90.
- RICARDO, A. M. C. (2008). *Caracterização do escoamento turbulento em canais com vegetação emersa rígida. Aplicação ao estudo da resistência hidráulica*. Master’s thesis, Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- RICARDO, A. M. C. (2009). Optimizing the location of sampling points for double-averaged turbulent quantities in flows within arrays of rigid emergent stems. In: *33rd IAHR Congress*. Vancouver, British Columbia, Canada: IAHR.
- SCHLICHTING, H. (1968). *Boundary - Layer Theory*. McGraw Hill, 6th ed.

- SIMÃO, J. G., RICARDO, A. M. & FERREIRA, R. M. L. (2009). Análise de sensibilidade a medições piv para a caracterização de escoamentos hidráulicamente rugosos com moderada submersão relativa. In: *3^a Conferencia Nacional em Mecânica de Fluidos, Termodinâmica e Energia*.
- SMITH, J. D. & MCLEAN, S. R. (1977). Spatially-averaged flow over a wavy surface. *Journal of Geophysical Research* **82**(12), 1735–1746.
- SVEEN, J. K. & COWEN, E. A. (2004). *Quantitative Imaging Techniques and Their Applications to Waavy Flows*. Capítulo 1. University of Oslo, Noruega.
- TANINO, Y. & NEPF, H. M. (2008). Laboratory investigation of mean drag in a random array of rigid, emergent cylinders. *Journal of Hydraulic Engineering* **134**(1), 34–41.
- TROPEA, C., YARIN, A. & FOSS, J. (2007). *Springer handbook of experimental fluid mechanics*. Springer Verlag.
- WERELEY, S. T. & MEINHART, C. D. (2000). Accuracy improvements in particle image velocimetry algorithms. In: *10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*. Fundação Calouste Gulbenkian/Centro de Estudos em Inovação, Tecnologia e Políticas de Desenvolvimento (IST). (disponível em <http://in3.dem.ist.utl.pt/conflaser/>).
- WESTERWEEL, J. (1993). *Digital particle image velocimetry: theory and application*. Ph.D. thesis, University of Delft, Delt, Netherlands.
- WESTERWEEL, J. (1997). The effect of a discrete window offset on the accuracy of cross-correlation analysis of digital piv recordings. *Experiments in Fluids* **23**, 20–28.
- WHITAKER, S. (1967). Diffusion and dispersion in porous media. *American Institute of Chemical Engineers* **13**(3), 420–427.
- WHITE, B. L. & NEPF, H. M. (2003). Scalar transport in random cylinder arrays at moderate reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics* **487**, 43–79.
- WHITE, B. L. & NEPF, H. M. (2008). A vortex-based model of velocity and shear stress in a partially vegetated shallow channel. *Water Resources Research* **44**(W01412).
- WILSON, N. R. & SHAW, R. H. (1977). A higher order closure model for canopy flow. *Journal of Applied Meteorology* **16**, 1197–1205.
- YEN, B. C. (2002). Open channel flow resistance. *Journal of Hydraulic Engineering* **128**(1), 20–39.